

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

LENNOKKIPARVIEN SENSORIT JA KOMMUNIKAATIO

Pro gradu -tutkielma

yliluutnantti
Jarno Tuominen

Sotatieteiden maisterikurssi 9
Maasotalinja

huhtikuu 2020

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 9	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Jarno Tuominen	
Tutkielman nimi LENNOKKIPARVIEN SENSORIT JA KOMMUNIKAATIO	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2020	Tekstisivuja 63 Liitesivuja 0
TIIVISTELMÄ <p>Lennokit ja miehittämättömät ilma-alukset ovat tulleet sekä asevoimien että siviilien käyttöön viime vuosina. Yksi kehittyvä ominaisuus lennokeissa on parveilukyky. Lennokkien yhteydessä termillä parveilu (englanniksi <i>swarming</i>) tarkoitetaan usean lennokin toimintaa yhdessä siten, että jokaista lennokkia ei tarvitse ohjata erikseen ihmisen toimesta. Jotta parven lennokit eivät törmäisi toisiinsa tai ympäristön esteisiin, tarvitsevat ne sensoreita ympäristön havainnointiin ja oman sijaintinsa ylläpitämiseen. Näiden sensorien tietojen välittämisellä ja yhdistämisellä parven muiden lennokkien kesken voidaan saavuttaa parvelle kyky toimia ainakin osin autonomisesti ilman suoraa ihmisen ohjausta.</p> <p>Tässä tutkielmassa selvitetään eri sensoreiden, paikannusjärjestelmien ja kommunikaatiojärjestelmien käytettävyyttä pienten lennokkien parveilukykyyn luomisessa. Tutkielman päättökysymyksenä on ”Miten ympäristö- ja paikkatieto välittyy lennokkiparvessa?”. Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuusanalyysi. Tutkielmassa perehdytään lisäksi tutkielman kirjoitushetkellä markkinoilla olevien tai markkinoille tulevien autonomisia ominaisuuksia omaavien yksittäisten lennokkien sensoreihin, paikannusjärjestelmiin ja tiedonsiirtoon.</p> <p>Tulosten perusteella markkinoilla olevissa tai markkinoille tulevissa pienissä lennokeissa on sensoreiden, paikannusjärjestelmien ja kommunikaatiojärjestelmien puolesta kyky parveiluun. Lennokkien toiminta-alue jää kuitenkin pieneksi johtuen pienten lennokkien sensorien ominaisuuksista. Lennokkien todellinen parveilukyky vaatii kuitenkin muutakin kuin tässä tutkielmassa käsiteltyjä järjestelmiä. Tällainen teknologia on esimerkiksi parven ”ajattelun” mahdollistava tekoäly, jota ei tässä tutkimuksessa käsitellä.</p>	
AVAINSANAT lennokit, parveilu, sensorit, paikannus, tiedonsiirto	

LENNOKKIPARVIEN SENSORIT JA KOMMUNIKAATIO

Sisältö

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Tutkimustilanne	3
1.2.	Tutkimusongelma.....	5
1.3.	Tutkimusmenetelmät.....	5
1.4.	Määritelmät	6
1.5.	Näkökulma ja rajaukset.....	11
1.6.	Lähdemateriaalin esittely	11
2.	SENSORIT YMPÄRISTÖN HAVAINNOINTIIN	13
2.1.	Tavalliset kamerat	18
2.2.	Infrapunakamerat	20
2.3.	Lidar	22
2.4.	Ultraääni	23
2.5.	Yhteenveto	24
3.	SENSORIT JA JÄRJESTELMÄT OMAN SIJAINNIN MÄÄRITTÄMISEEN	26
3.1.	Satelliittipaikannus	26
3.2.	Inertiajärjestelmät.....	29
3.3.	Kuvantunnistus.....	34
3.4.	Radiosignaalit (signals of opportunity)	37
3.5.	Yhteenveto	42
4.	LENNOKKIPARVEN KOMMUNIKAATIO.....	44
4.1.	Lennoikkien rakenteen vaikutus kommunikaatiolle	44
4.2.	Lennoikkien siirtämä tieto.....	46
4.3.	Lennoikkien tietoverkot	47
4.4.	Reititys MANET-verkoissa.....	49
4.5.	Kommunikaatio parven ulkopuolelle	50
4.6.	Elektronisen häirinnän vaikutukset.....	52
4.7.	Yhteenveto	53
5.	TIEDON VÄLITTYMINEN LENNOKKIPARVESSA	55
5.1.	Lukumäärä.....	55
5.2.	Lennoikin monimutkaisuus	56
5.3.	Parven rakenne	57
5.4.	Heterogeenisyys	58
5.5.	Yhteydenpito ihmiseen.....	58
5.6.	Autonomisuuden vaikutus.....	59

6.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	61
6.1.	Luotettavuus.....	62
6.2.	Jatkotutkimusehdotuksia.....	63

LENNOKKIPARVIEN SENSORIT JA KOMMUNIKAATIO

1. JOHDANTO

Lennokit ja miehittämättömät ilma-alukset ovat tulleet sekä asevoimien että siviilien käyttöön viime vuosina. Varsinkin pienet harrastekäyttöön suunnitellut lennokit ovat suosittuja niin siviilien kuin myös asevoimienkin käytössä. Myös erilaiset autonomiset tai ihmisen etäohjaamat järjestelmät kiinnostavat asevoimia. Esimerkiksi Yhdysvaltain asevoimat on useiden vuosien ajan käyttänyt miehittämättömiä ilma-aluksia taistelukentän valvontaan ja vaikuttamiseen taistelukentälle.

Yksi kehittyvä ominaisuus lennokeissa on parveilukyky. Lennokkiparvella tarkoitetaan useasta lennokista muodostuvaa parvea. Lennokkien yhteydessä termillä parveilu (englanniksi *swarming*) tarkoitetaan usean lennokin toimintaa yhdessä siten, että jokaista lennokkia ei tarvitse ohjata erikseen ihmisen toimesta. Toimivalla parveilukyvyllä voidaan esimerkiksi yhdelle ohjaajalle tuoda ohjaukseen useampi lennokki, jotka toimivat osittain autonomisesti. Lisäksi tuntemalla lennokkiparven mahdolliset heikkoudet, voidaan niitä vastaan kehittää vastatoimia.

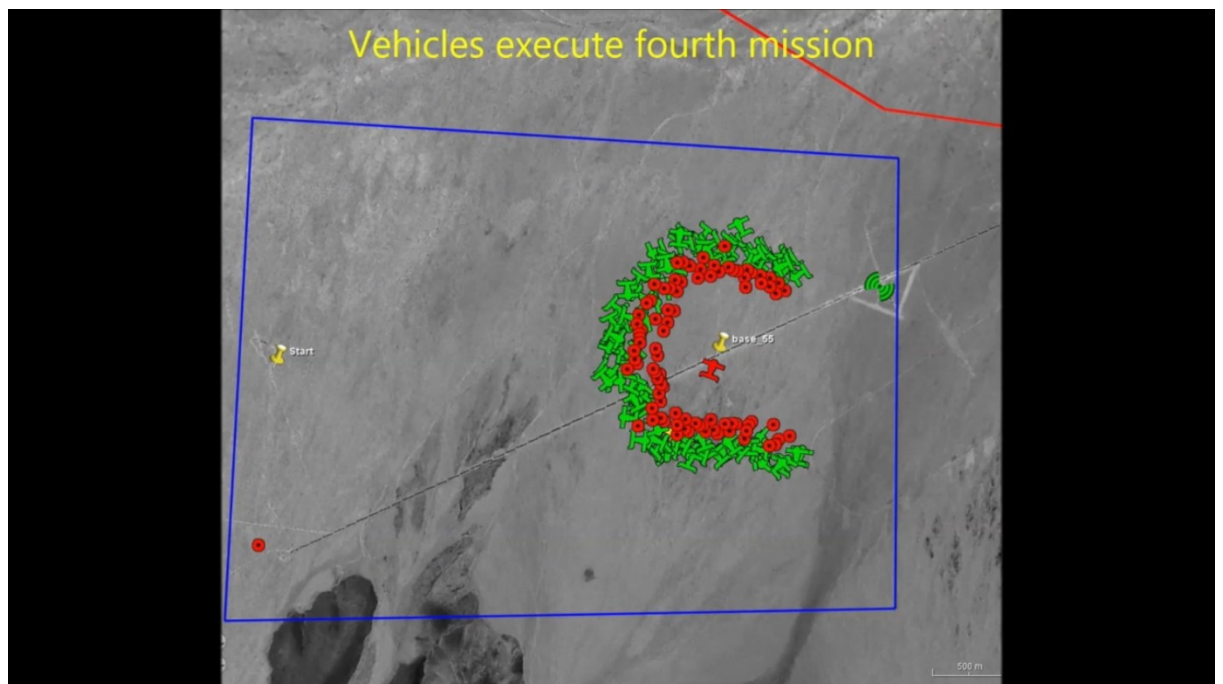
VTT:n Jari Laarni, Hanna Koskinen ja Antti Väättänen tutkivat vuonna 2016 osana Puolustusministeriön MATINE-projektia robottiparvi-ohjauksen operointikonseptia ”*RoboConOps- Operointikonseptin kehittäminen robottiparvi-ohjaukseen*” -tutkimuksessa. Tutkimuksessa kehitettiin miehittämättömien robottiparvi-ohjaukseen operointikonsepti. Operointikonseptin kehittämistä varten tutkimuksessa luotiin kaikille kolmelle Puolustusvoimien puolustushaaralle toimintaskenaario, jossa erilaiset robottiparvet toimisivat. Merivoimien toimintaskenaario käsitteli merialueiden valvontaa, Ilmavoimien toimintaskenaariossa käsiteltiin lennokkiparvea tiedustelutehtävässä ja Maavoimien toimintaskenaariossa käsiteltiin robottiparvi-ohjauksen käyttöä kaupunkijääkärijoukon apuna rakennetulla alueella. Tutkimus tunnistaa vaatimuksina esimerkiksi maavoimalliseen rakennetun alueen toimintaympäristöön liittyen kyvyn liikkua parvena rakennetulla alueella talojen ja muiden rakennelmien seassa sekä kyvyn liikkua ja suunnistaa myös sisätiloissa. Tutkimuksessa todettiin myös suorituskykyhaasteiksi rakennusten ja rakennelmien aiheuttamat esteet, muu tietoliikenne rakennetulla alueella sekä siviilit ja muu autonominen tai ohjattu robottitoiminta. [51]

Selvitäkseen edellä mainituista haasteista, jotta parven lennokit eivät törmäisi toisiinsa tai ympäristön esteisiin, tarvitsevat ne sensoreita ympäristön havainnointiin ja oman sijaintinsa ylläpitämiseen. Näiden sensorien tietojen välittämällä ja yhdistämisellä parven muiden lennokkien kesken voidaan saavuttaa parvelle kyky toimia ainakin osin autonomisesti. Tällöin ihmisen ei tarvitse ohjata jokaista lennokkia erikseen ja parvi toimii tehokkaasti. Parvi tarvitsee yhteistä kommunikaatiota, sillä yksittäisen lennokin väistäessä havaitsemaansa estettä, täytyy mahdollisesti muiden lennokkien väistää kyseistä lennokkia.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää millaisia sensoreita parveilevat lennokit käyttävät ympäristönsä ja sijaintinsa tarkkailuun sekä miten tämä tieto välitetään parven sisällä. Tämän perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä lennokkiparvien suorituskyvystä ja sen rajoitteista sotilaallisessa toiminnassa.

Parveilevat lennokit ovat suhteellisen uusi asia ja niin Yhdysvallat kuin Kiinakin ovat esitelleet erilaisia parveilevia lennokkijärjestelmiä viime vuosina. Sotilaskäytössä olevia parveilevia lennokkijärjestelmiä ei tämän työn kirjoitushetkellä ole ainakaan julkisen tiedon mukaan käytössä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö niitä kehitettäisi koko ajan.

Yhdysvaltain asevoimat esitteli vuonna 2016 julkaistulla videolla Perdix-lennokkiparvea, jossa oli 103 toistensa kanssa kommunikoivaa lennokkia [70; 79]. Yhdysvaltain asevoimilla on myös toinen lennokkiparviprojekti nimeltään LOCUST (*Low-Cost UAV Swarming Technology*), jota kehittää *Office of Naval Research (ONR)* [58; 67]. Myös kiinalainen valtionomisteinen *China Electronics Technology Group Corporation (CETC)* on esitellyt parveilevia lennokkeja [57; 48]. Toistaiseksi kaikki esitellyt järjestelmät ovat olleet aseistamattomia, mutta ONR esittelee LOCUST-järjestelmän esittelyvideolla skenaariota, jossa lennokeilla on myös vaikuttamiskyky [58]. Edellä olevien lisäksi Yhdysvaltain asevoimien tutkimuslaitos DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) tutkii yleisesti robottiparvien ohjaamista ja parviälyä OFFSET-projektissaan [10]. Muilta valtioilta kuten esimerkiksi Venäjältä ei ole ainakaan julkisuudessa esiteltyjä parviälyä käyttäviä lennokkijärjestelmiä. Tämä ei luonnollisestikaan tarkoita, etteikö sellaisia olisi kehitteillä tai käytössä tulevaisuudessa.



Kuva 1. Kuvakaappaus Perdix-järjestelmää esittelevästä videosta, jossa esitellään 103 yhteistoiminnassa toimivaa lennokkia. [70]

Myös siviilipuolella kehitetään lennokkiparvia. Toistaiseksi nämä ovat erilaisia valoesityksiä ja maailmanennätysyrityksiä lennokkien määrässä. Vuonna 2018 kiinalainen eHANG teki Guinessin maailman ennätyksen 1374 lennokista koostuvalla parvella, joka muodosti erilaisia kuvioita taivaalle [48]. Yhdysvaltalainen Intel nokitti myöhemmin samana vuonna tekeillä uuden maailman ennätyksen 2018 lennokilla [34]. Ainakin Intelin lennokit ovat suunniteltu mahdollisimman kevyiksi, eikä niissä ilmeisesti ole minkään laisia ympäristöä havainnoivia sensoreita, vaan ovat esiohjelmoituja ja lentävät täysin niitä ohjaavan tietokoneen varassa [34]. Yhdysvallat ja Kiina siis ovat korkealla lennokkiparvien kehityksessä myös siviilipuolella.

1.1. Tutkimustilanne

Miehittämättömiä ilma-aluksia on Maanpuolustuskorkeakoulussa tutkittu jonkin verran. Tutkimukset käsittelevät pääsääntöisesti lennokkia yksittäisenä. Parveilevia lennokkeja käsitteleviä tutkimuksia on kaksi. Timo Suomalaisen pro gradu -tutkielma *”Lennokkiparven taistelutekniset käyttömahdollisuudet kaupunkijääkärikomppanian hyökkäyksessä”* on tehty Sotataidon laitoksessa ja se käsittelee lennokkiparven käyttöä taisteluteknisestä näkökulmasta. Toinen työ on Lauri Pitkäsen pro gradu -tutkielma *”Miehittämättömät ilma-alukset taistelussa”*, jossa käsitellään myös miehittämättömien ilma-alusten parveilua lyhyesti. Lisäksi tutkielmassa esitetään yhtenä jatkotutkimuskohteena miehittämättömien ilma-alusten parveilu. Kumpikaan näistä töistä ei käsittele lennokkien parveiluun tarvittavaa tekniikkaa.

Muita Maanpuolustuskorkeakoulussa tehtyjä lennokkeja käsitteleviä tutkimustöitä ovat Sampo Nurmion pro gradu -tutkielma ”*Pienten kaupallisten multikopterien suorituskyky taistelukentän valvonnassa*”, joka nimensä mukaisesti käsittelee kyseisten lennokkien soveltuvuutta ja käytettävyyttä taistelukentän olosuhteisiin. Lisäksi Mikko Mäenpää käsittelee pro gradu -tutkielmassaan ”*Kyberelektronisten menetelmien soveltuvuus lennokkien torjuntaan lentotukikohdassa*” lennokkien torjuntaa kybersodankäynnin ja elektronisen sodankäynnin avulla.

Myös Maanpuolustuskorkeakoulun ulkopuolella tehdään tutkimusta lennokkeihin liittyen. Esimerkiksi Niroj Pokhrel käsittelee lennokkien esteiden väistämiskykyä Aalto-yliopistoon tehdyssä diplomityössään ”*Drone Obstacle Avoidance and Navigation using Artificial Intelligence*”. Työ käsittelee yksityiskohtaisesti erilaisia lennokkien esteiden havaitsemiseen soveltuvia sensoreita, mutta ei käsittele näiden käyttöä lennokkien parveiluun liittyen.

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, VTT:n Jari Laarni, Hanna Koskinen ja Antti Väättänen tutkivat vuonna 2016 osana Puolustusministeriön MATINE-projektia robottiparvien ohjauksen operointikonseptia ”*RoboConOps- Operointikonseptin kehittäminen robottiparvien ohjaukseen*” -tutkimuksessa. Tutkimuksessa selvitettiin autonomisten robottien ja ihmisen yhteistoimintaa erilaisissa käyttötilanteissa ottamatta kantaa lennokkien tekniikkaan.

Lennokkien parveiluun ja autonomiaan hyödynnettäviä teknologioita, kuten esteiden väistämistä, paikantamista ja tiedonsiirtotekniikoita on kuitenkin tutkittu laajasti ympäri maailman. Näissä tutkimuksissa on myös esimerkiksi kenttäkokeiden avulla selvitetty erilaisten esteiden väistämisteknologioiden käyttöä lennokeissa. Myös hyvin rajallista parveilukykyä on myös tutkittu erilaisissa käyttötarkoituksissa. Myös maassa liikkuvien autonomisten järjestelmien, kuten autonomiset autot, teknologia voi olla sovellettavissa lennokkeihin, jolloin myös niihin liittyen tehty tutkimus liittyy tämän tutkimuksen aiheisiin.

Myös useat yritykset, kuten jo edellä mainittu Intel, kehittävät parveilukykyä lennokkeihin. Yritysten tekemä tutkimustyö aiheen suhteen on kuitenkin tuotekehitykseen tähtäävää, eikä myöskään julkista. Sotilaallisesta näkökulmasta Yhdysvalloissa asevoimien tutkimuslaitos DARPA hallinnoi erilaisia lennokkeja käsitteleviä tutkimuksia, kuten jo mainittu OFFSET-projekti.

Tämän tutkimuksen ohella Maanpuolustuskorkeakoulussa tutkitaan samanaikaisesti lennokkeja useassa pro gradu -tutkielmassa, jotka eivät kuitenkaan käsittele lennokkien parveilukykyä.

1.2. Tutkimusongelma

Havainnollistetaan tutkimusongelma esimerkin kautta. Muodostetaan sadan lennokin parvi, jossa jokainen lennokki havainnoi ympäristöään ja kommunikoi muiden lennokkien kanssa. Jos jokainen lennokki välittää jonkin sensorin dataa parven jokaiselle muulle lennokille, siirtyy tietoa parvessa satakertainen määrä yksittäiseen lennokkiin verrattuna. Jos sensorin datan määrä on suuri, siirtyy parvessa hyvin paljon dataa. Toisaalta myös useasta pienestä lähetyksestä voi muodostua parvessa hyvin suuri datamäärä, kun se välitetään parven sisällä. Suuri tietomäärä vaatii paljon parven kommunikaatiojärjestelmältä, mikä mahdollistaa tietyissä olosuhteissa parven kommunikaation häirinnän esimerkiksi elektronisen sodankäynnin keinoin tai muun vaikuttamisen kybersodankäynnin keinoin.

Tutkimuksen päätutkimuskysymyksenä on:

- Miten ympäristö- ja paikkatieto välittyy lennokkiparvessa?

Päätutkimuskysymykseen apuna käytetään kolmea alatutkimuskysymystä:

- Mitä sensoreita lennokit käyttävät ympäristön havainnointiin?
- Mitä sensoreita ja paikantamisjärjestelmiä lennokit käyttävät oman sijainnin määrittämiseen?
- Miten yksittäiset ja parveilevat lennokit kommunikoivat?

Päätutkimuskysymyksellä pyritään selvittämään millaisilla sensoreilla ja järjestelmillä lennokkiparvi havainnoi ympäristöään miten kyseinen tieto välitetään parven sisällä ja sen ulkopuolelle. Ensimmäisellä alatutkimuskysymyksellä pyritään selvittämään sensoreita, joita lennokit voivat käyttää ympäristön (esimerkiksi esteiden ja maastonmuotojen) havainnointiin. Toisella alatutkimuskysymyksellä pyritään selvittämään sensoreita ja paikantamisjärjestelmiä, joita lennokkiparven lennokit voivat käyttää oman paikkansa selvittämiseen. Kolmannella alatutkimuskysymyksellä pyritään selvittämään lennokkiparven kommunikaatiota parven sisällä sekä sen ulkopuolelle parvea ohjaavalle ihmiselle.

1.3. Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen tutkimusmenetelmänä on laadullinen kirjallisuusanalyysi. Kirjallisuusanalyysillä pyritään selvittämään perusteet lennokkien käyttöön soveltuvista sensoreista ja paikantamisjärjestelmistä sekä lennokkien kommunikaatiojärjestelmistä. Kirjallisuusanalyysillä vastataan tutkimuksen alatutkimuskysymyksiin. Koska lennokkiparvet ovat teknologiana melko

uusi, eikä varsinkaan sotilaskäyttöön suunnitelluista parvista, kuten Perdix- tai LOCUST-järjestelmistä ole saatavilla juurikaan teknistä tietoa, käytetään perustietojen hankintaan myös tapaustutkimusta jo olemassa olevista autonomiaa sisältävistä ”tavallisista” parveiluun kykenemättömistä lennokeista. Näin saadaan jokin kuva yleisestä lennokkien tämän hetken sensorien tasosta, sekä käsitys millä tavoin ne voisivat toimia parveilevissa lennokeissa. Tutkimuksen päätutkimuskysymykseen vastataan hyödyntäen kirjallisuusanalyysillä saatuja tuloksia ja arvioimalla aikaisemmin yksittäisten lennokkien käytössä olevien teknologioiden soveltuvuutta parveilukäyttöön.

1.4. Määritelmät

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom määrittelee OPS M1-32 -määräyksessä ”*Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin käyttäminen ilmailuun*” lennokin, miehittämättömän ilma-aluksen sekä kauko-ohjatun ilma-aluksen. **Lennokki** on lentämään tarkoitettu laite, jonka mukana ei ole ohjaajaa ja jota käytetään harraste- tai urheilutarkoitukseen. **Miehittämätön ilma-alus** on ilma-alus, joka on tarkoitettu lentämään ilman ilma-aluksessa mukana olevaa ohjaajaa. Määritelmä ei kuitenkaan käsitä lennokkia. **Kauko-ohjattu ilma-alus** on miehittämätön ilma-alus, jota ohjataan kauko-ohjauspaikasta ja käytetään lentotyöhön. [53 s. 1-2]

Sotilasilmailun viranomaisyksikkö määrittelee antamassaan sotilasilmailumääräyksessä SIM-Ma-Lt-014 ”*Lentokelpoisuus- ja operointivaatimukset miehittämättömässä sotilasilmailussa*” lennokin ja miehittämättömän ilma-aluksen samalla tavalla kuin Traficom. Näiden lisäksi kyseisessä määräyksessä määritellään termit miehittämätön sotilasilma-alus, lentolaite, sotilaslentolaite. **Miehittämätön sotilasilma-alus** tarkoittaa sotilasilmailuun käytettävää miehittämätöntä ilma-alusta ja ne jaetaan luokkiin III ja IV. **Lentolaite** tarkoittaa miehittämättömään sotilasilmailuun käytettävää tyyppihyväksymätöntä laitetta. **Sotilaslentolaite** on miehittämättömään sotilasilmailuun käytettävä laite, jolta ei kuitenkaan edellytetä samaa luotettavuutta kuin miehittämättömältä sotilasilma-alukselta ja ne jaetaan luokkiin I, IIA ja IIB. [52 s. 5-6]

Edellä mainitut määritelmät ovat hieman ongelmallisia, sillä esimerkiksi DJI Mavic 2 -kopteri on edellä mainittujen määritelmien mukaan harrastekäytössä lennokki, ammattimaisessa kuvaustoiminnassa kauko-ohjattu ilma-alus ja Puolustusvoimien käytössä tyyppihyväksymättömänä käytettävä lentolaite. Kuitenkin Puolustusvoimat käyttää termiä minilennokki nimityksenä käytössä olevalle Aeronautics Orbiter 2B -järjestelmän ilma-alukselle. Tässä tutkimuksessa käytetään termiä lennokki kuvaamaan miehittämätöntä ilma-alusta. Miehittämättömästä ilma-aluksesta voidaan käyttää myös englanninkielisiä termejä *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), *Unmanned Aerial System* (UAS) tai median käyttämää pieniä lennokkeja kuvaavaa

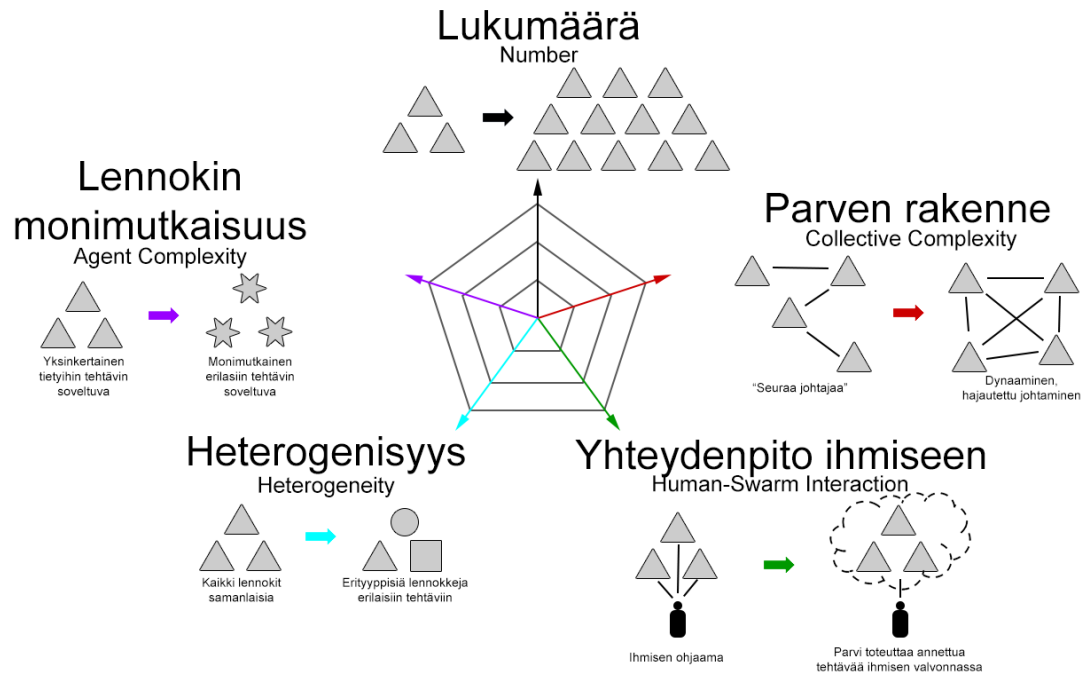
termiä drone, jota englannissa käytetään kuitenkin myös suurista miehittämättömistä ilma-aluksista.

Tässä tutkimuksessa tutkitaan pienistä lennokeista koostuvia parvia. Myöskään pienelle lennokille ei ole yksiselitteistä määritelmää. Traficom määrittää OPS M1-32 -määräyksessä kauko-ohjatulle ilma-alukselle sekä lennokille suurimmaksi lentoonlähdomassaksi 25 kg [53]. Myös sotilasilmailumääräys SIM-Ma-Lt-014 määrittelee luokkien I ja IIB sotilaslentolaitteiden suurimmaksi lentoonlähdomassaksi 25 kg. Lisäksi IIB luokalla toimittaessa tiheästi asutulla alueella saa lentolaitteen lentoonlähdomassa olla enintään 10 kg. SIM-Ma-Lt-014 määrittää lisäksi tyyppihyväksymättömälle lentolaitteelle suurimmaksi lentoonlähdomassaksi 7 kg. [52] Jo aiemmin mainittu DJI Mavic -kopteri luokitellaan Puolustusvoimissa tyyppihyväksymättömäksi lentolaitteeksi. Tässä tutkimuksessa tarkoitetaan pienellä lennolla lennokkia, jonka suurin lentoonlähdomassa on 7 kg, joka kattaa täten esimerkiksi DJI Mavic 2 -lennokin tapaiset ja samassa kokoluokassa olevat lennokit.

Lennokkiparvelle ei ole yksiselitteistä määritelmää. VTT:n RoboConOps-tutkimuksessa määritellään autonominen robottiparvi muodostuvan suuresta joukosta ilman ulkoista ohjausta yhtenäisenä kokonaisuutena toimivia samankaltaisia robotteja [51 s. 2]. Yhdysvaltain asevoimien tutkimuslaitos DARPA määrittelee robottiparven laajemmin omassa OFFSET-projektissaan (*OFFensive Swarm Enabled Tactics*).

DARPA määrittelee OFFSET-projektissaan robottiparville viisi ominaisuutta: lukumäärä (*number*), yksittäisen robotin monimutkaisuus (*agent complexity*), parven rakenne (*collective complexity*), robotin tyyppien monimuotoisuus (*heterogeneity*) ja vuorovaikutus ihmisen kanssa (*human-swarm interaction*). Robottien lukumäärä parvessa ei ole vakioitu vaan se voi esimerkiksi vaihdella alle kymmenestä yli sataan tai tuhansiin. Yksittäinen robotti voi olla yksinkertainen tiettyä tehtävään tekemään suunniteltu, tai se voi olla hyvinkin monimutkainen alusta, joka kykenee moneen erilaiseen tehtävään. Toisaalta parven ei tarvitse koostua pelkästään samanlaisista roboteista, vaan parvessa voisi olla eri tehtäviä varten erilaisia robotteja. Ei ole myöskään yhtä tiettyä tapaa, jolla parven robotit kommunikoivat keskenään ja toteuttavat sille annettua tehtävää. Robotit voivat olla kaikki yhteydessä toisiinsa ja jakaa havaitsemaansa tilannetietoa toisillensa tai ne voivat esimerkiksi seurata yhtä parvea johtavaa robottia. Viimeisenä ominaisuutena parvella on oltava jokin tapa kommunikoida ihmisen kanssa. Ääripäinä tästä on esimerkiksi se, että ihminen ohjaa parvea suoraan tai parvelle annetaan tehtävä ja parvi suorittaa tehtävää automaattisesti ja ilmoittaa ihmiselle, kun tehtävä on toteutettu. [9; 11] DARPA:n robottiparven määritelmä on myös kuvassa 2. DARPA:n määritelmässä käytetään termiä robotti, sillä määritelmällä voi käsitellä myös maassa tai vedessä toimivia parvei-

levia järjestelmiä. Tässä tutkimuksessa määritelmää hyödynnetään kuitenkin lennokkien näkökulmasta.



Kuva 2. DARPA:n lennokkiparven määritelmä [9]

Lennokkiparvien yhteydessä puhutaan paljon autonomisuudesta. Autonomisuus voidaan jakaa tasoihin, esimerkiksi Yhdysvaltojen ilmavoimien tutkimuslaboratorion (*Air Force Research Laboratory*) *Autonomous Control Level (ACL)* -luokittelun mukaisesti yhteentoista tasoon [12]. Tasolla 1 järjestelmä kykenee toteuttamaan ennalta määritellyn tehtävän ja tasolla 10 järjestelmä kykenee täysin itsenäiseen päätöksentekoon ja ympäristön havainnointiin sekä tiedon analysointiin [12]. Taso 0 käsittää täysin kauko-ohjatun lennokin, eikä siten ole autonominen [12]. Aikaisemmin mainitussa RoboConOps-tutkimuksessa käytettiin ACL-luokittelun sijasta ihmisen ja koneen vuorovaikutusta kuvaavaa kymmenportaista taulukkoa, jossa tiivistetysti tasolla 1 ihminen tekee kaiken, tasolla 5 kone toimii ehdottamansa ja ihmisen hyväksymän vaihtoehdon mukaan ja tasolla 10 kone tekee kaiken itsenäisesti huomioimatta ihmistä ollenkaan. RoboConOps-tutkimuksessa todetaan käsiteltyihin skenaarioihin robottiparvien ohjaamiseen soveltuviksi autonomisuuden tasoiksi tasot 5-7. Tasolla 6 kone antaa ihmiselle hetken aikaa muuttaa koneen toimintaa ja tasolla 7 kone toimii itsenäisesti, jonka jälkeen se kertoo ihmiselle oman toimintansa. [51 s. 3] ACL-luokitus keskittyy näistä enemmän järjestelmän kyvykkyyksiin, joten autonomisuuden luokitteluun käytetään tässä tutkimuksessa ACL-luokittelua.

ACL-luokitus on tiivistettynä taulukkoon 1. ACL-luokittelussa lennokkien ominaisuudet on jaettu neljään osa-alueeseen sotilaallisessa päätöksenteossa käytetyn OODA-silmukan (*Observe, Orient, Decide, Act*) mukaisesti. Autonomisesti toimivien lennokkien on luonnollisesti

ensin havaittava ympäristöstään niitä kiinnostavat kohteet. Lennokkien on tämän jälkeen analysoitava aistimansa tieto, jonka perusteella ne kykenevät tekemään päätöksen toiminnasta. Viimeisenä on itse päätöksen perusteella tapahtuva toiminta ja lopputulos. Usean lennokin toimiessa yhdessä vaativat ne luonnollisesti kommunikaatiota keskenään halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. [12]

Ensimmäinen osa-alue on havainnointi, jossa määritellään tasoittain vaatimukset lennokkien kyvyille aistia ja havainnoida ympäristöään. Alimmalla tasolla 0 (*kauko-ohjattu*) lennokka aistii tai mittaa omaan liikettään. Tasolla 5 (*reaaliaikainen lennokkien koordinointi*) lennokit kykenevät aistimaan ympäristöään omilla sensoreillaan, sekä täydentämään tietoa muilta lennokeilta tai lennokkien ohjaajalta saatavalla tiedolla. Tasolla 10 (*täysi autonomia*) lennokeilla on täysi kyky taistelukentän seuraamiseen ilman apua muilta. [12]

Toinen osa-alue on arviointi, joka kuvaa tasoittain lennokkien kykyä arvioida omaa tilaansa ja tehtävän suoritusvaihetta. Tasolla 0 lennokka seuraa vain ohjaajan komentoja, eikä arvioi aistimaansa tietoa ja tasolla 10 lennokit arvioivat tilannetta omatoimisesti ja tarvittaessa koordinoivat muiden kanssa. Tasolla 5 lennokit kykenevät seuraamaan niille annettua taktista suunnitelmaa, sekä ottamaan olosuhteet huomioon toiminnassaan. [12]

Kolmas osa-alue on päätöksenteko, joka kuvaa lennokkien kykyä päätöksentekoon aikaisemman arvioinnin perusteella. Tasolla 0 lennokeilla ei ole päätöksentekokykyä, vaan lennokkien ohjaaja tekee päätökset. Tasolla 5 lennokit kykenevät suunnittelemaan lentoreittinsä uudelleen ja välttämään törmäyksiä. Tasolla 10 taasen lennokit kykenevät täysin itsenäiseen toimintaan. [12]

Neljäs osa-alue on toiminta, joka kuvaa lennokkien kyvykkyyttä erilaisten tehtävien suorittamiseen. Tasolla 0 lennokka ei kykene suorittamaan tehtäviä omatoimisesti, vaan se noudattaa pelkästään ohjaajan antamia ohjauskomentoja. Tasolla 5 useasta lennokista muodostuva parvi kykenee ohjaajan antaman taktisen tehtävän toteuttamiseen itsenäisesti. Tasolla 10 lennokit kykenevät tehtävän suorittamiseen lähes täysin ilman ulkoista ohjausta. [12]

Taso	Kuvaus	Havainnointi, tilanneymmärrys	Arvioi, analyysi, koordinointi	Päätöksenteko	Toiminta, kyvykkyys
10	Täysi autonomia	Tietoinen kaikesta taistelutilassa olevasta	Koordinoi tarvittaessa	Kykenee täyteen itsenäisyyteen	Tehtävän suoritus lähes täysin ilman ohjausta
9	Taistelutilan parvitieto	Ymmärrys omien ja vihollisten toiminnasta taistelutilassa. Ei tarvitse ulkoisia lähteitä.	Parven strategisten tavoitteiden seuraaminen	Hajautettu päätöksenteko Yksilöt kykenevät taktiseen päätöksen tekoon	Parven strategisen tehtävän suorittaminen ilman ohjausta
8	Taistelutilan ymmärrys	Ymmärrys omien ja vihollisten toiminnasta lähiympäristössä. Tarvitsee vähän tietoa ulkopuolelta	Parven strategisten tavoitteiden seuraaminen	Koordinoitu taktinen suunnittelu Kohteiden valinta	Parven strategisen tehtävän suorittaminen minimaalisella ohjauksella
7	Taistelutilan tuntemus	Ulkoisilla lähteillä täydennetty lähiympäristön tuntemus	Parven taktisten tavoitteiden seuraaminen	Yksilöiden tehtävien suunnittelu tehtävän täyttämiseksi	Parven taktisen tehtävän suorittaminen minimaalisella ohjauksella
6	Reaaliaikainen lennokkien yhteistoiminta	Ulkoisilla lähteillä täydennetty pitkän matkan aistiminen omilla sensoreilla	Parven taktisten tavoitteiden seuraaminen	Koordinoitu lentoreittien suunnittelu ja toteutus tehtävän täyttämiseksi	Parven taktisen tehtävän suorittaminen minimaalisella ohjauksella
5	Reaaliaikainen lennokkien koordinointi	Ulkoisilla lähteillä täydennetty ympäristön aistiminen omilla sensoreilla	Parven taktisen suunnitelman seuraaminen. Kyky olosuhteiden huomioimiseen	Lentoreitin uudelleensuunnittelu omatoimisesti Törmäysten väistäminen	Ohjaajan määrittämisen taktisen suunnitelman toteutus parvella itsenäisesti
4	Sopeutumisen virheisiin tai tapahtumiin	Lennokit välittävät omat tietonsa muille	Lennokin taktisen suunnitelman seuraaminen. Useimpien virheiden ja olosuhteiden huomiointi	Tapahtumiin perustuva lentoreittien uudelleensuunnittelu omatoimisesti. Törmäysten väistäminen	Ohjaajan määrittämisen taktisen suunnitelman toteutus itsenäisesti
3	Varma toiminta virheisiin tai tapahtumiin	Lennokin tilan seuranta	Lennokin taktisen suunnitelman seuraaminen. Useimpien virheiden ja olosuhteiden huomiointi	Kyky tehtävän keskeyttämiseen	Ohjaajan määrittämisen taktisen suunnitelman toteutus itsenäisesti
2	Muutettava tehtävä	Lennokin tilan seuranta	Kyky tehtävän vaihtamiseen ohjaajalla	Valinta ennalta määritettyjen tehtävien välillä	Ohjaajan määrittämisen suunnitelman toteutus itsenäisesti
1	Ennalta suunniteltu tehtävä	Oman liikkeen ja sijainnin aistiminen	Lennokin tilan ilmoittaminen	Ennalta suunniteltu tehtävä	Lennokkien etäisyys kilometrejä muusta ilmailusta.
0	Kauko-ohjattu	Oman liikkeen aistiminen	Ohjaajan komennoilla	Ei ole	Ohjaus ohjaajan toimesta

Taulukko 1. ACL-luokitus [12]

1.5. Näkökulma ja rajaukset

Tutkimuksessa ei perehdytä varsinaisesti mihinkään yksittäiseen lennokkijärjestelmään, vaan tutkimuksessa käsitellään yleisesti pienistä lennokeista koostuvaa lennokkiparvea, jonka lennokit havainnoivat ympäristöään ja välittävät tietonsa muille parven jäsenille sekä lennokkiparvea ohjaavalle ihmiselle. Yhdysvaltain asevoimien Perdix ja LOCUST toimivat kuitenkin esimerkkeinä tutkimuksessa.

Tutkimuksen näkökulma on sensoreiden, paikannusjärjestelmien ja kommunikaatiojärjestelmien tekniset ominaisuudet, mahdollisuudet ja vaatimukset. Kuten ACL-tasojen taulukosta voi huomata, liittyy lennokkien autonomiaan myös merkittävästi parven äly. Parven älyä ja tiedon analysointia ei kuitenkaan käsitellä tässä tutkimuksessa, vaan keskitytään edellä mainittujen järjestelmien tuomiin kyvykkyyksiin lennokeissa.

Kuvitteellisen lennokkiparven lennokin rakenteeseen ei kiinnitetä huomiota, sillä itse lentolaitte voidaan ajatella pelkästään lavettina, joka kantaa sensoreita ja kommunikaatiojärjestelmiä hyötykuormanaan. Huomattavaa on kuitenkin, että esimerkiksi aikaisemmin mainitut sotilaalliset projektit Perdix ja LOCUST ovat tuottaneet tai tutkivat pieniä kiinteäsiipisiä (*lentokonemallisia*) lennokkeja, kun taas siviilipuolella kiinnostus vaikuttaisi olevan enemmän pyöriväsiipisissä (*kopterimallisissa*) laitteissa. Syynä tähän voi olla se, että kiinteäsiipisillä laitteilla on mahdollista saada suurempi toimitasäde kuin pyöriväsiipisillä laitteilla. Lisäksi kiinteäsiipinen vaatii kiitotien tai jonkinlaisen katapultin, jolla sille saadaan riittävä lentonopeus siipien toimimiseksi, mikä tekee kiinteäsiipisistä lentolaitteista kuluttajakäyttöön epäkäytännöllisiä. Esimerkiksi Perdix-lennokit esittelyvideolla pudotetaan toiminta-alueelle hävittäjälentokoneista [70]. Toisaalta myös valoshow'ta esittävää lennokkiparvea voi olla haastava tehdä kiinteäsiipisillä lennokeilla, joiden on liikuttava koko ajan pysyäkseen ilmassa, kun pyöriväsiipiset lennokit pystyvät leijumaan paikallaan.

1.6. Lähdemateriaalin esittely

Tässä tutkimuksessa käytetään lähdemateriaalina pääasiassa lennokkeihin ja niiden käyttämiin sensoreihin, paikannusjärjestelmiin ja kommunikointijärjestelmiin liittyviä tutkimuksia ja konferenssijulkaisuja. Näiden lisäksi pohjatiedon selvittämiseksi lähteinä käytetään myös sensoritekniikkaan, paikannusjärjestelmiin ja kommunikaatiojärjestelmiin liittyvää kirjallisuutta, joka ei välttämättä suoraan käsittele lennokkeja alustana, mutta kertoo kuitenkin perusteita kyseisten järjestelmien toiminnasta.

Näiden lisäksi käytetään internet-lähteitä, joilla pyritään tuomaan viimeisintä tietoa käsiteltäviin aiheisiin. Näitä ovat esimerkiksi eri valmistajien esitteet heidän tuotteistaan ja niiden

ominaisuuksista ja uutisartikkelit uusista teknologioista. Uusia teknologioita käsittelevät uutiset perustuvat usein teknologian kehittäneiden organisaatioiden tuottamaan materiaalin. Teknologian kehittäneen organisaation ollessa voittoa tavoitteleva yritys, voivat nämä antaa mahdollisesti liian hyvän kuvan teknologian toimivuudesta. Samoin valmistajien esitteet pyrkivät yleensä tuomaan esiin oman tuotteen markkinointitarkoituksessa, eivätkä siten välttämättä ole täysin totuudenmukaisia, mutta antavat kuitenkin jonkinlaisen kuvan laitteen tai teknologian käytettävyydestä.

2. SENSORIT YMPÄRISTÖN HAVAINNOINTIIN

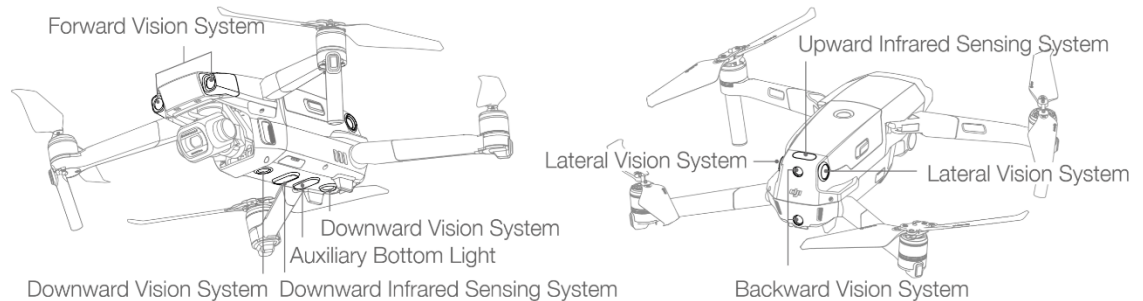
Tässä luvussa vastataan alatutkimuskysymykseen ”Mitä sensoreita lennokit käyttävät ympäristön havainnointiin?”. Lennokkien autonomian lisäämiseksi ja niiden esteiden havainnointikyvyn luomiseksi lennokeissa joudutaan käyttämään sensoreita ympäristön havainnointiin.

Nämä sensorit voidaan jakaa toimintatavan mukaan aktiivisiin ja passiivisiin sensoreihin. Aktiivisia sensoreita ovat esimerkiksi lidar, tutka sekä erilaiset etäisyysmittarit ja passiivisia sensoreita esimerkiksi erilaiset kamerat. Aktiiviset sensorit perustuvat sensorin lähettämään säteilyyn, joka heijastuu takaisin sensorille havaittavaksi. Passiiviset sensorit eivät lähetä omaa säteilyä vaan perustuvat kohteen itsensä säteilemään tai muusta lähteestä heijastuneeseen säteilyyn. Passiiviset sensorit ovat yleensä aktiivisia sensoreita kevyempiä, halvempia ja vähemmän virtaa kuluttavia. Kuitenkin aktiiviset sensorit toimivat paremmin tilanteissa, joissa esimerkiksi ympäristön valaistus on liian heikko passiiviselle sensorille. Aktiivisilla sensoreilla on lisäksi mahdollista saada esimerkiksi etäisyystieto ilman erillistä kuvan analysointia ja laskentaa. [68]

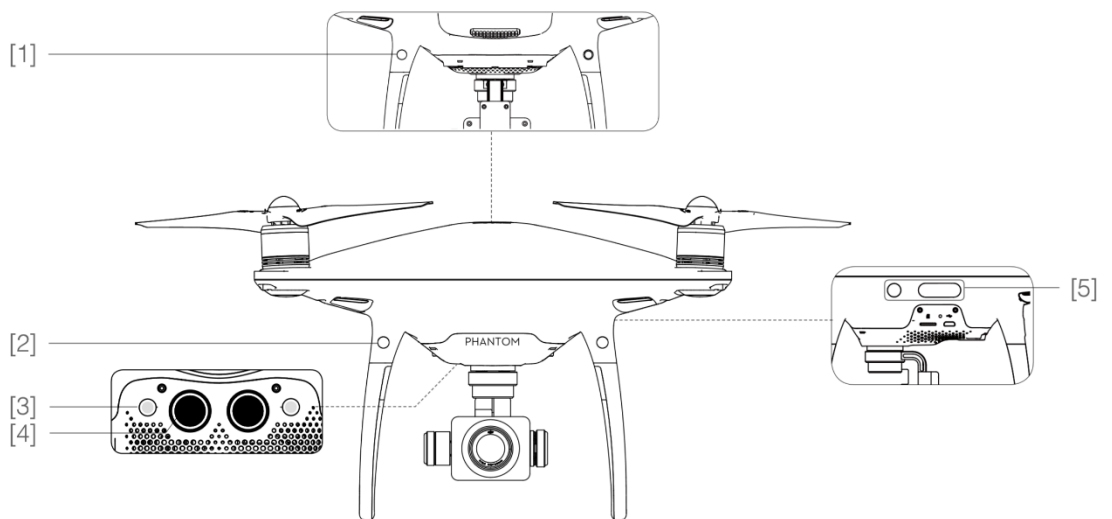
Tavalliselle kuluttajalle tarkoitetuissa pienissä tyypillisesti neliroottorisissa nelikoptereissa on jo olemassa autonomista lentoa ja esteiden väistämistä varten olevia sensoreita. Tämän tyyppisiä lennokkeja ovat esimerkiksi kiinalaisen DJI:n valmistamat Mavic 2 ja Phantom 4 Pro. Kumpikaan lennokka ei kykene parveiluun, mutta ne edustavat kehittynyttä tekniikkaa ja kykenevät rajoitetusti autonomiseen lentoon. Molempia koptereita voidaan pitää pienikokoisina. Mavic 2 on mitoiltaan 322 mm x 242 mm x 84 mm (pituus, leveys ja korkeus), se on halkaisijaltaan 354 mm ja sen massa on 907 grammaa [19 s. 62]. Phantom 4 Pro on hieman suurempi, sen halkaisija ilman potkureita on 350 mm ja massa potkurien kanssa on 1388 grammaa [20 s. 62]. Kyseiset lennokit käyttävät autonomisia toimintoja paikallaan pysymiseen, esteiden havaitsemiseen ja väistämiseen autonomisissa lentotiloissa sekä lähtöpaikalle palaamiseen [19; 20]. DJI käyttää lennokeissa olevista ympäristöä havainnoivista järjestelmistä nimeä *Vision System* sekä *Infrared Sensing System* [19].

Mavic 2 -kopterissa *Vision System* koostuu kahdeksasta eri puolille kopteria asennetusta kamerasta ja *Infrared Sensing System* koostuu kopterin ylä- ja alapuolille havainnoivista infrapuna sensoreista [19 s. 20]. Phantom 4 Pro -kopterissa *Vision System* koostuu kuudesta eri puolille kopteria asennetusta kamerasta ja kahdesta ultraäänisensorista [20 s. 27]. Phantom 4 Pro -kopterin *Infrared Sensing System* koostuu kahdesta kopterin kummallakin sivulla olevasta infrapunamoduulista [20]. Kummassakin kopterissa on edellä mainittujen sensoreiden lisäksi hyötykuormana oleva vakautettu kamera, joka pystyy 4K-tarkkuuden (3840x2160 pikseliä) videokuvaukseen ja 20 megapikselin (5472x3648 pikseliä) valokuvaan [19; 20]. Hyöty-

kuormana olevaa kameraa ei kuitenkaan hyödynnetä esteiden havainnointiin, mutta sitä käytetään kuitenkin esimerkiksi kuvattavan kohteen seuraamiseen lennokkien eri kuvaustiloissa [19; 20]. DJI Mavic 2 ja Phantom 4 Pro lennokkien sensorit ovat havaittavissa alla olevissa kuvissa.



Kuva 3. DJI Mavic 2 -lennokki ja sen Vision System ja Infrared Sensing System sensorien sijoittelu [19 s. 20].



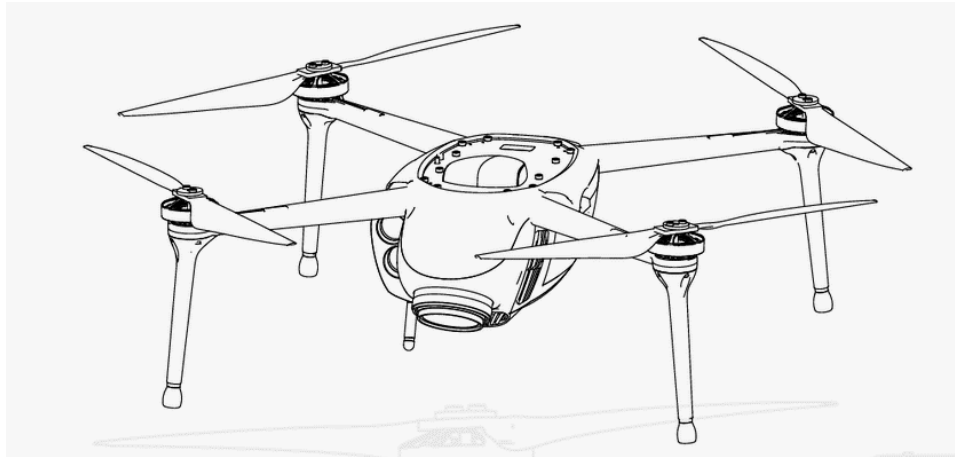
Kuva 4. DJI Phantom 4 Pro -lennokki ja sen Vision System ja Infrared Sensing System -sensorit. 1, 2 ja 3 kamerat, 4 ultraäänisensori ja 5 infrapunasensori [20 s. 27].

Yhdysvaltalainen Skydio käyttää Skydio 2 -lennokissaan pelkästään lennokin ylä- ja alapuolelle sijoitettuja tavallisia kameroita. Kameroita on yhteensä kuusi, kolme kummallakin puolella ja ne kykenevät kalansilmäobjektiivien avulla näkemään joka suuntaan lennokin ympärille [77]. Lennokki on kooltaan 223 mm x 273 mm x 74 mm, eli lähes samankokoinen DJI Mavic 2 -lennokin kanssa [77]. Skydio 2 -lennokin halkaisija on tällöin noin 352 mm. Lennokin massa on 775 grammaa, eli hieman kevyempi kuin DJI Mavic 2 [77]. Lennokin valmistaja vertaakin Skydio 2 -lennokkia ja DJI Mavic 2 -lennokkia keskenään markkinoinnissaan ja valmistaja kehuu lennokkinsa olevan huomattavasti autonomisempi kuin esimerkiksi Mavic 2 [77]. Lennokissa on DJI:n lennokkien tavoin myös vakautettu hyötykuormana oleva päiväkamera [77].



Kuva 5. Skydio 2 ja kolme lennokin päällä olevaa kalansilmäobjektiivikameraa. [77]

Yhdysvaltalaisen Kespry:n maanmittaukseen suunniteltu Kespry 2S-lennokki käyttää esteiden havaitsemiseen lidar-sensoria. Kespry 2S:n lidar-sensori on sijoitettuna kopterin etuosaan, ja kyseinen kopteri pystyy valmistajan mukaan havaitsemaan ja väistämään esteitä 50 metrin päästä kopterin edessä. Lennokki on mitoiltaan samankaltainen aikaisemmin esiteltyjen DJI:n lennokkien kanssa ja sen massa on 2 kilogrammaa. Lennokissa on hyötykuormana kiinteästi asennettu kamera. [47]



Kuva 6. Kespry 2S-lennokki, jossa lidar-sensori rungon vasemmalla puolella [47]

Edellä esiteltyjen siviilikäyttöön valmistettujen lennokkien lisäksi esimerkiksi yhdysvaltalainen Shield AI valmistaa sotilaskäyttöön tarkoitettua Nova-lennokkia. Valmistaja ei kerro Nova-lennokin teknisistä tiedoista juuri mitään, mutta lennokista saatavien kuvien ja videoiden mukaan se vaikuttaa olevan mitoiltaan samankokoinen esimerkiksi DJI Phantom 4 Pro -lennokin kanssa [73]. Lisäksi lennokki vaikuttaa samankokoiselta kuin Kespry 2S, jonka massa on 2 kilogrammaa. Valmistajan mukaan Nova on tarkoitettu esimerkiksi sotilaskäyttöön rakennusten tiedusteluun autonomisesti ilman suoraa sotilaan ohjausta, jolloin sotilaat voivat keskittyä muuhun kuin lennokin ohjaamiseen [73]. Nova hyödyntää autonomiaansa kameroita, lidar-sensoria sekä muita sensoreita, kuten akustisia sensoreita [75]. Akustisen sensorin voidaan olettaa tarkoittavan ultraäänisensoria. Shield AI Nova-lennokin esittelyvideolla olevissa valonvahvistimen avulla kuvatuissa osissa lennokki valaisee ympäristöään infrapuna-avalolla [73], jolloin voidaan olettaa lennokin käyttävän myös infrapunakameroita.



Kuva 7. Shield AI Nova [74]

Shield AI on myös kehittämässä Nova-lennokin seuraajaa, Nova 2 -lennokkia. Nova 2 -lennokista valmistaja ilmoittaa kuitenkin huomattavasti tarkemmin sen käyttämät sensorit. Valmistajan mukaan Nova 2 -lennokissa on 14 päivä/infrapunakameraa, lämpökamera ja ultraäänianturi. Kameran lisäksi varustettu infrapunasalamoilla pimeätoiminnan helpottamiseksi. Nova sekä Nova 2 käyttävät kumpikin sensorien tuottaman datan analysointiin Shield AI:n Hivemind-tekoälyä. Shield AI Nova 2 vaikuttaa valmistajan kuvien mukaan olevan samankokoinen kuin alkuperäinen Nova-lennokki. Huomattavana erona edellä esiteltyihin siviililennokkeihin, Nova-lennokeissa on rungon päällä oleva kookas antenni. [74] Muissa lennokeissa antennit ovat todennäköisesti sijoitettuna rungon sisään. Shield AI Nova-lennokit eivät vielä kykene toimimaan useasta lennokista koostuvana parvena, mutta valmistajan mukaan niissä on laitteiston puolesta kyky toimia yhdessä, ja varsinainen parveilu on tarkoitus mahdollistaa vuonna 2021 julkaistavalla ohjelmistopäivityksellä Hivemind-tekoälyyn [74].

Lennot	Halkaisija	Massa	Sensorit
DJI Phantom 4 Pro	350 mm	1388 g	päiväkamerat, infrapunasensorit, ultraääni
DJI Mavic 2	354 mm	907 g	päiväkamerat, infrapunasensorit
Skydio 2	352 mm	775 g	päiväkamerat
Kespry 2S	noin 350 mm (arvio)	2000 g (2 kg)	lidar-sensori
Shield AI Nova	noin 350 mm (arvio)	2000 g (arvio)	päiväkamerat, infrapunakamerat, lidar-sensori, ultraääni
Shield AI Nova 2	noin 350 mm (arvio)	2000 g (arvio)	päiväkamerat, infrapunakamerat, ultraääni

Taulukko 2. Esiteltyjen lennokkien koko ja sensorit

Edellä esiteltyjen lennokkien koko, massa ja sensorit on koostettuna taulukkoon 2. Esiteltyjä lennokkeja käsiteltäessä on huomioitava, että ne ovat pyöriväsiipisiä. Varsinkin DJI Mavic 2 -lennokilla perustoiminto esteen havaitessa on pysähtyä, jonka jälkeen lennokka kykenee jatkamaan liikettään esimerkiksi ylös, kiertäen esteen [19]. Perdix-lennokin kaltaisella kiinteäsiipisellä lennokilla pysähtyminen ei erilaisen lentotavan takia ole mahdollista.

2.1. Tavalliset kamerat

Tavallinen näkyvän valon alueella toimiva kamera on sensorina halpa, kevyt, pienikokoinen ja kuluttaa vähän sähköä [71]. Näitä ominaisuuksia voidaan pitää lennokokikäytössä haluttuina, sillä pienillä lennokeilla on tyypillisesti alhainen kuormankantokyky. Alhaisen kuormankantakyvyn takia pienillä lennokeilla on myös pieni akkukapasiteetti, jolloin paljon sähköä kuluttavat sensorit vähentävät lennokin lentoaikaa. Kamera sensorina tuottaa myös hyvin paljon tietoa [71]. Kuva vaatii kuitenkin analysointia, eikä esimerkiksi anna suoraan etäisyyttä sensorin havaitsemisiin kohteisiin. Eri kuvan analysointiin käytettävät tekniikat soveltuvat eri tavoin erilaisiin ympäristöihin. Esimerkiksi optiseen virtaukseen (*optical flow*) perustuvat algoritmit eivät toimi hyvin sisätiloissa, jossa on paljon tasaisia pintoja, kun taas sisätiloihin paremmin soveltuvat perspektiiviin perustuvat algoritmit eivät välttämättä toimi tehokkaasti ulkona [71].

Jotta kamera sensorina toimisi tehokkaasti, tarvitsee se riittävästi valoa ympäristössä saadakseen käyttökelpoisen kuvan, jossa on analysointia varten riittävästi selkeitä kiintopisteitä [71]. Kameran on myös havaittava selkeitä kuvioita, jotta kuvadatasta saadaan ylipäättänsä seurattavia kiintopisteitä [71]. Kameran kuvatessa tasaisen väristä seinää tai esimerkiksi lennokin alla olevaa vesistöä, ei kamerasensorin tuottamasta kuvasta saada kiintopisteitä.

Nämä edellä mainitut rajoitteet ovat havaittavissa myös DJI Phantom 4 Pro ja Mavic 2 -lennokkien *Vision System* -järjestelmän rajoitteina. Kameroista koostuva *Vision System* ei toimi kunnolla ympäristöissä, joissa ei ole selkeitä kuvioita tai ympäristö on muuten epäselvä, kuten heijastava tai liikkuva. *Vision System* ei välttämättä toimi kunnolla lennettäessä huonosti valaistujen (valaistusvoimakkuus alle 10 luksia) tai liian kirkkaasti valaistujen (valaistusvoimakkuus yli 40 000 luksia) pintojen lähellä. *Vision System* ei myöskään välttämättä tunnista kuvioita, jos ympäristön valaistuksen voimakkuus on alle 100 luksia. [19; 20] 10 luksia ympäristön valaistuvoimakkuutena tarkoittaa ilta- tai aamuhämärää. 100 luksia taas vastaa hyvin synkkää päivää ja 40000 luksia valaistusvoimakkuutena on päivänvalon ja suoran auringon valon välillä. [22] Kamerasensorin tuottama data on myös riippuvainen lennokin liikumisnopeudesta. Lennokin liikkuessa nopeasti kuvat sumenevat, jolloin kiintopisteiden tunnistaminen kuvista vaikeutuu ja esimerkiksi kahden peräkkäisen kuvan vertaamiseen perustu-

vat algoritmit eivät toimi tehokkaasti, sillä kuvien välille tulee liikaa muutoksia [71]. Myös DJI Phantom 4 Pro ja Mavic 2 -lennokkien *Vision System* -järjestelmän rajoitteiksi mainitaan vajaatoiminta lennokin lentäessä liian nopeasti [19; 20].

Kameroita voidaan perinteisesti käyttää kahdella eri asettelulla, yksittäin ja pareittain. Pareittain asetellut kamerat ovat asennettu tunnetun etäisyyden päähän toisistaan, jolloin niiden avulla voidaan muodostaa stereokuva ympäristöstä, josta on mahdollista saada myös syvyystieto sensorijärjestelmän edestä [69]. Tämä vastaa periaatteeltaan ihmissilmien toimintaa, jolla ihminen pystyy hahmottamaan syvyyseroja. Stereojärjestelmän tuottaman analysoidun tiedonperusteella lennokille saadaan suoraan etäisyys sensorijärjestelmän havaitsemiin kohteisiin [69].

Esimerkiksi DJI Mavic 2 -lennokki käyttää eteen, taakse ja alas stereokamerajärjestelmiä, jolloin lennokki pystyy havaitsemaan näissä suunnissa syvyyserot suoraan. Sivusuuntiin DJI Mavic 2 käyttää yksittäisiä kameroita. [19] Stereokamerajärjestelmät sopivat hyvin kohtisuoraan liikkuvien esineiden havaitsemiseen [35]. Pyöriväsiipisen lennokin tyypillisesti liikkues- sa eteen tai taakse päin sekä ylös ja alas, ovat DJI Mavic 2 lennokin sensorivalinnat näiden osalta perusteltuja.

Yksittäisillä kameroilla on algoritmista riippuen helppoa havaita sivuttaista liikettä tai kierto- liikettä. Yksittäisillä kameroilla kuvan analysointi voi perustua esimerkiksi optiseen virtauk- seen, jossa kahden tunnetulla välillä otetun kuvan kiintopisteiden liikkeiden perusteella voi- daan laskea etäisyys kiintopisteiden ja kameran välillä. [35] Lennokin lentäessä eteen tai taak- se päin kohteet lennokin sivuilla liikkuvat kamerasensoriin nähden sivuittain, jolloin edellä mainittu algoritmi on toimiva. Yksittäinen kamera vaatii kuitenkin lavetin liikkeen etäisyyden laskemiseksi. Yksittäistä kameraa, kuten lennokin hyötykuormana olevaa kameraa, voidaan käyttää myös lennokin liikesuunnassa olevien kohteiden havaitsemiseen [71]. Liikesuuntaan havaitsevien stereokamerajärjestelmien ja sivusuuntia havainnoivien yksittäiskameroiden yh- distämisellä on saatu toimivampia esteiden havainnointijärjestelmiä, kuin käyttämällä pelkäs- tään vain jompaakumpaa kameraratkaisua [35]. DJI Mavic 2 -lennokin kameraratkaisun voi- daan olettaa perustuvan samankaltaiseen havaintoon.

Kuten aikaisemmin mainittiin, Skydio 2 -lennokki käyttää omassa ympäristöä seuraavassa kameraratkaisussaan yhteensä kuutta kalansilmäobjektiivin varustettua kameraa, jotka on asennettu kolmiomuodostelmiin lennokin ylä- ja alapuolille. Kameroiden tuottama data analy- soidaan hyödyntäen tekoälyä lennokin omalla prosessorilla käyttämällä yhdeksää neuroverk- koa [77]. Tekoälylaskentaa varten lennokissa on NVIDIA:n valmistama Tegra

TX2 -järjestelmäpiiri [77]. Valmistaja ilmoittaa lennokin kykenevän autonomiseen lentoon 16 m/s nopeudella, joka on huomattavasti enemmän kuin DJI Mavic 2 -lennokin 10 m/s nopeus [77; 19].

Skydio 2:n kameraratkaisu eroaa huomattavasti edellä esitellyjen DJI:n lennokkien kamerajärjestelmistä. Siinä missä DJI:n lennokit perustavat toimintansa yksittäisiin kameroihin tai stereokameroihin ja todennäköisesti erilaisiin kuvaa seuraaviin algoritmeihin, Skydio 2 syöttää kaikkien kameroiden tuottaman kuvadatan neuroverkkoihin perustuvalla tekoälyllä, joka muodostaa ympäristötietoisuuden lennokille. Valmistajan mukaan Skydio 2 lennokka tuottaa kuudella kameralla 45 megapikseliä dataa, kun taas Skydion mukaan DJI Mavic 2 -lennokka kerää vain 4,9 megapikseliä dataa [77]. Myös Shield AI:n lennokit käyttävät tekoälyä sensorien tuottaman datan analysointiin, mutta yhdistävät omalle Hivemind-tekoälylleen myös muiden sensorien tuottaman datan [74].

Tavallisten kameroiden etuina voidaan pitää niiden yksinkertaisuutta sekä muokattavuutta. Kamerrat tuottavat tietoa, jota analysoimalla eri tavoilla, voidaan niillä saada haluttu tieto ympäristöstä. Laskenta kuvadatasta voi kuitenkin olla raskasta ja tätä varten esimerkiksi Skydio 2 -lennokissa on oma tekoälyprossessori kameroiden datan analysointiin. Kamerrat eivät myöskään toimi hyvin huonoissa valaistusolosuhteissa, mikä esimerkiksi sotilaallisissa tarkoituksissa voi aiheuttaa haasteita.

2.2. Infrapunakamerrat

Infrapunakamerajärjestelmät toimivat nimensä mukaisesti infrapuna-alueella. Koska ihmisilmä ei näe infrapunavaloa, voidaan infrapunakameroiden yhteydessä käyttää infrapunavalaisua. Infrapunavalon käyttäminen mahdollistaa myös näiden kamerajärjestelmien käytön myös huonossa valaistuksessa. Aktiivista valaisua hyödyntävät infrapunakamerrat toimivat yleensä 700-1000 nanometrin lähi-infrapuna aallonpituusalueella [62 s. 839]. Infrapunakamerajärjestelmiä on erityyppisiä, kuten stereokameroihin perustuvia ratkaisuja, yksittäiseen kameraan perustuvia ratkaisuja sekä valon kulkuaikaan perustuvia ratkaisuja.

Intelin kehittämä RealSense R200 -kamerajärjestelmä perustuu kahteen stereoasettelulla olevaan infrapuna-alueen kameraan ja infrapunalaserprojektoriin. Kamerrat toimivat kuten edellisessä alaluvussa esitelty näkyvän valon stereokamerajärjestelmä. R200-järjestelmässä on kuitenkin lisäksi infrapunalaserprojektori, jolla kameroiden kuvausalue valaistaan. R200-järjestelmän kamerrat ovat 70 mm erillään toisistaan olevia 640x480 pikselin tarkkuuteen pystyviä mustavalkokameroita. Kameroiden maksimi kuvanopeus on 90 Hz, eli kamera ottaa 90 kuvaa sekunnissa, tavallisen kameras kuvanopeuden ollessa 30 Hz. RealSense

R200 -järjestelmän projektori heijastaa säteenhajottavan linssin avulla valmiiksi muotoillun kuvion kuvattavalle alueelle. Heijastettu kuvio näkyy järjestelmän kameroille pimeässä sekä on tulkittavissa myös tasaisilta pinnoilta. Järjestelmän kuvantunnistusalgoritmi käyttää projektorin luomaa kuviointia kiintopisteinä, mikä parantaa järjestelmän tarkkuutta ja mahdollistaa tasaisten kuviottomien pintojen tunnistamisen, toisin kuin näkyvän valon kamerajärjestelmillä. RealSense R200 -järjestelmässä on infrapunakameroiden lisäksi tavallinen päivävalokamera, jolla saadaan myös näkyvän valon alueen kuvia. [46]

Toinen Intelin kehittämä infrapunakamerajärjestelmä RealSense SR300 perustuu yhteen infrapunakameraan ja infrapunalaserprojektoriin. SR300-järjestelmän kamerasensori on 1/6 tuuman kokoinen 640x480 pikselin tarkkuuteen kykenevä sensori. Kameran kuvanopeus on R200-järjestelmään tai tavalliseen kameraan verrattuna hyvin suuri, 600 kuvaa/sekunti. SR300-järjestelmän projektori toimii eri tavalla R200-järjestelmän projektoriin verrattuna. SR300-järjestelmässä projektorin lasersäde ensin muotoillaan linssillä pystysuoraksi, jonka jälkeen sädetä liikutetaan sivusuunnassa mikrosysteemiin (*micro electro-mechanical system, MEMS*) perustuvalla peilillä koko kuvattavan alueen valaisemiseksi ja halutun kuvion luomiseksi. [84]

Valon kulku-aikaan (*time-of-flight, ToF*) perustuvissa kameroissa sensorina on suureen kuvanopeuteen perustuva kamerasensori, ja moduloivaa valoa lähettävä valaisin. Järjestelmän valaisin lähettää moduloitua valoa, joka heijastuu järjestelmän edessä olevista kohteista takaisin sensorille. Sensori aistii heijastuvan valon ja mittaa jokaista sensorin pikseliä kohti saapuvan valon kulkuajan (*time-of-flight*) perustuen saapuvan valon vaihe-eroon. [17] Järjestelmän toimiessa lähetetyn valon kulkuajan mittaamisesta, pystyy myös ToF-kamera toimimaan ympäristöissä, joissa ei ole selviä kuvantunnistusalgoritmin tunnistettavia kuvioita. Valaisin on myös yksinkertaisempi kuin edellä mainituissa Intelin RealSense -järjestelmissä, joissa haluttu kuvio heijastetaan laserin avulla kamerasensoreita varten. Kuitenkin sensorin mitatessa saapuvan valon vaihe-eroa, rajoittaa käytetty valon modulointitaajuus käytettävää etäisyyttä [8]. ToF-kameroilla noin 30 MHz modulointitaajuudella saavutetaan noin 15 metrin kantama, sillä maksietäisyyden ulkopuolelta vastaanotetun valon vaihe-eroa ei kyetä enää erottamaan lyhyemmän etäisyyden valon vaihe-erosta [8]. Ongelma voidaan ratkaista käyttäen kahta eri taajuuksilla toimivaa ToF-järjestelmää, jolloin maksimietäisyyden ulkopuolelta saapuvan valon vaihe-ero on mitattavissa kahden järjestelmän eroista [8]. Useamman rinnakkain asetetun ToF-kameran rakennelma olisi todennäköisesti lennökkikäyttöön liian monimutkainen ja mahdollisesti raskas. Myös aktiiviseen valaisuun käytettävän valaisimen valotehon leviäminen suuremmalle alueelle etäisyyden kasvaessa todennäköisesti rajoittaa ToF-kamerajärjestelmän kantamaa.

DJI Phantom 4 Pro -lennokki käyttää sivusuunnissa molemmilla puolilla kolmiulotteiseen kuvaan pystyvää infrapunasensoria, jota ei ole tarkemmin nimetty [20]. DJI Phantom 4 Pro -lennokki ei pysty käyttämään infrapunasensoriaan, jos lennokin vierellä on toinen samanlainen lennokki [20]. Tämä viitanee aktiiviseen sensoriin, jolloin toinen vierellä oleva lennokki häiritsee sensorin toimintaa. Tämän perusteella tämän tyyppiset aktiiviset sensorit eivät välttämättä sovi lähellä toisiaan lentäviin parveileviin lennokkeihin.

Infrapuna-alueen kamerajärjestelmät pystyvät luomaan kolmiulotteisen kuvan näkökentästään. Tästä kolmiulotteisesta kuvasta on mahdollista helposti saada etäisyydet sensorin havaitsemiin kohteisiin ja pyrkiä esimerkiksi väistämään niitä. Näiden sensoreiden käyttöä kuitenkin rajoittaa aktiivisen valaisun rajoitteet, kuten valotehon pieneminen etäisyyden kasvaessa ja ToF-kameroiden yhteydessä käytettävästä taajuudesta johtuva etäisyyden rajallisuus.

2.3. Lidar

Lidar on lyhenne englannin kielen sanoista *Light Detection and Ranging*, joka myös joskus kirjoitetaan tyyliteltysti LiDAR. Lidar perustuu lasersäteen heijastumiseen sensorin edessä olevista kohteista [49 s. 27]. Lidar-sensori mittaa joko lasersäteen kulkemaa aikaa tai palautuneen signaalin vaihe-eroa [49 s. 27]. Sensori pystyy näiden tietojen perusteella laskemaan etäisyyden sensorin edessä olevaan kohteeseen. Vaihe-eroon perustuvat sensorit käyttävät jatkuvaa lasersädettä, kun taas kulkuaikaan perustava sensorilähettäjä lähettää säteet pulsseina [49 s. 27]. Lidar-sensori antaa vain etäisyyden sensorin edessä olevaan kohteeseen, johon sensorin lähettämä lasersäde osuu, jolloin saadaan käytännössä vain yksiulotteinen havainto. Yksinkertaisimmillaan ajateltuna laseretäisyysmittari on yksiulotteinen lidar-sensori.

Yksittäistä laser-sädettä voidaan liikuttaa, jolloin sensorin liikkeellä on mahdollista mitata etäisyys kaikkiin ympärillä oleviin kohteisiin, tuottaen tällöin kaksiulotteisen ”kuvan” ympäristöstä [49 s. 28]. Tämä käytännössä vaatii peilin ja mekaniikan sen liikuttamiseen esimerkiksi pyörittämällä peiliä [49 s. 28]. Kaksiulotteinen lidar-sensori on täten yksiulotteista sensoria monimutkaisempi ja enemmän sähköä kuluttava, sillä pyörivä liike toteutetaan pyörittämällä sensoria esimerkiksi sähkömoottorilla. Pyörivä rakenne myös lisää kaksiulotteisen sensorin massaa yksiulotteiseen sensoriin verrattuna, mikä ei ole lennokokäytössä ideaalia. Yksiulotteisen sensorin kanssa voidaan hyödyntää esimerkiksi lavetin liikettä ympäristön havainnointiin, jolloin voidaan säästää sensorin massassa mutta osaa lennokin liikkeestä voidaan joutua käyttämään sensorin liikuttamiseen riittävän kattavan kuvan tuottamiseksi. Lennokilla on myös mahdollista muuttaa lentokorkeutta, jolloin lidar-sensorilla on mahdollista saada kolmiulotteisia havaintoja.

Lidar-sensori voi olla lennokissa myös hyötykuormana, jolloin sitä voidaan käyttää esimerkiksi maanmittaukseen [82]. Kespry 2S -lennokissa ei siitä julkaistujen kuvien perusteella ole pyörivää lidar-sensoria, vaan kyseisen lennokin lidar-sensori on todennäköisesti yksiulotteinen sensoria. Myös DJI Mavic 2 -lennokissa oleva infrapunasensori on todennäköisesti infrapunalaserilla toimiva lidar-sensori. DJI ei ilmoita Mavic 2 -lennokin infrapunasensorien kykenevän kolmiulotteiseen havainnointiin toisin kuin Phantom 4 Pro -lennokissa [19; 20]. DJI Mavic 2 -lennokki kykenee infrapunasensorillaan havaitsemaan vain suoraan sen ylä- tai alapuolella olevia kohteita [19], mikä viittanee vain yksittäiseen laser-säteeseen. Mavic 2 -lennokin infrapunasensoreita onkin tarkoitus käyttää lennokin lentäessä sisätiloissa [19]. Tällaisessa tilanteessa kyseisiä sensoreita todennäköisesti käytetään etäisyyden mittaamiseen lattiaan ja kattoon, jolloin saadaan lennokki leijumaan ja lentämään halutulla korkeudella.

Shield AI Nova-lennokki käyttää lidar-sensoria sekä hyötykuormana, että esteiden väistämiseen. Nova-lennokki kykenee lentäessään tuottamaan kartan rakennuksen sisätiloista lennokin ohjaajalle, sekä käyttämään kyseistä karttaa myös itse esteiden väistämiseen ja suunnistukseen rakennuksessa. Nova-lennokista olevien kuvien perusteella lennokin sensoria on yksiulotteinen sensoria. [74]

2.4. Ultraääni

Ultraäänisensorit perustuvat korkeataajuisen äänen heijastumiseen sensorin edessä olevista kohteista. Kuten yksiulotteinen lidar-sensoria, tuottaa ultraäänisensoria etäisyyden sensorin edessä olevaan kohteeseen tällä kertaa perustuen kuitenkin äänen kulkemaan aikaan. Ultraäänisensorit ovat halpoja ja pystyvät toimimaan valaistusolosuhteista riippumatta [15]. Kuitenkin sensorin lähettämä ääni leviää, äänet heijastuvat tai absorboituvat, jolloin sensorin suunta-tarkkuus kärsii. Tämä rajaa kyseisen sensorin käytön pääasiassa sisätiloihin [15].

DJI Phantom 4 Pro -lennokissa on lennokin pohjassa *Vision System* -näköjärjestelmään kuuluva ultraäänisensoria. Tällä sensorilla lennokki pyrkii mittaamaan etäisyyttä maahan pitääkseen itsensä oikealla lentokorkeudella ja mahdollistaakseen tarkan lentämisen sisätiloissa yhdessä muiden sensoreiden kanssa. DJI Phantom 4 Pro -lennokin ultraäänisensorin rajoitteeksi mainitaan vajaatoiminta lennokin lentäessä ääntä absorboivan materiaalin päällä. Lisäksi Phantom 4 -lennokin lähellä ei suositella käytettävän muita ultraäänilaitteita lennokin näköjärjestelmän ollessa käytössä. [20] Myös Shield AI Nova- ja Nova 2 -lennokeissa on valmistajan mukaan ultraäänisensoria, jota käytetään yhdessä muiden sensoreiden kanssa ympäristön havainnointiin ja alueen kartoittamiseen [74].

2.5. Yhteenveto

Esitellyt sensorit toimivat pääosin lyhyillä etäisyyksillä. Tähän syynä voi olla se, että ne ovat riittäviä niiden suunniteltuihin käyttötarkoituksiin, kuten lentämisen mahdollistamiseen sisätiloissa. Nämä voivat olla hyödyllisiä lennokkien toimiessa rakennetulla alueella myös ulkotiloissa. Aktiivisilla sensoreilla on mahdollista häiritä muita samankaltaisia sensoreita lähistöllä, mikä ei tee niistä helposti käyttökelpoisia lennokkiparviin käyttöön, jos lennokkien on tarkoitus lentää lähellä toisiaan. Passiiviset tavanomaisiin kameroihin perustuvat sensorit eivät häiritse muita sensoreita lähistöllä, mutta niillä ei pystytä saavuttamaan kykyä toimia huonoissa valaistusolosuhteissa. Tavalliset kamerasensorit ovat halpoja ja niiden suorituskyky riippuu käytettävistä algoritmeista ja kameroiden sijoittelusta. Tämä mahdollistaa erilaisten kameroiden käyttämisen joustavasti tarpeen mukaan. Koonnos käsiteltyjen sensoreiden ominaisuuksista on taulukossa 3.

Sensori	Tyyppi	Kyvyt	Haasteet
Yksittäinen kamera	passiivinen	yksinkertainen, halpa, kevyt, mahdollistaa useiden algoritmien tai tekoälyn käytön	kyky toimia pimeässä ja tasaisilla pinnoilla
Stereokamera	passiivinen	etäisyyden laskenta ilman lennokin liikettä	kyky toimia pimeässä ja tasaisilla pinnoilla
Infrapunakamerat, ToF-kamerat	aktiivinen	etäisyyden mittaaminen, toiminta pimeässä	aktiivivalaisu lyhentää aistittavaa etäisyyttä, lähellä olevat sensorit voivat häiritä toisiaan
Lidar	aktiivinen	tarkka etäisyyden mittaaminen, toiminta pimeässä	ympäristön havainnointi vaatii sensorin liikuttamisen
Ultraääni	aktiivinen	etäisyyden mittaaminen, toiminta pimeässä, ei sähkömagneettista säteilyä	lähellä olevat sensorit häiritsevät toisiaan, suuntatiedon epätarkkuus

Taulukko 3. Sensoreiden ominaisuudet

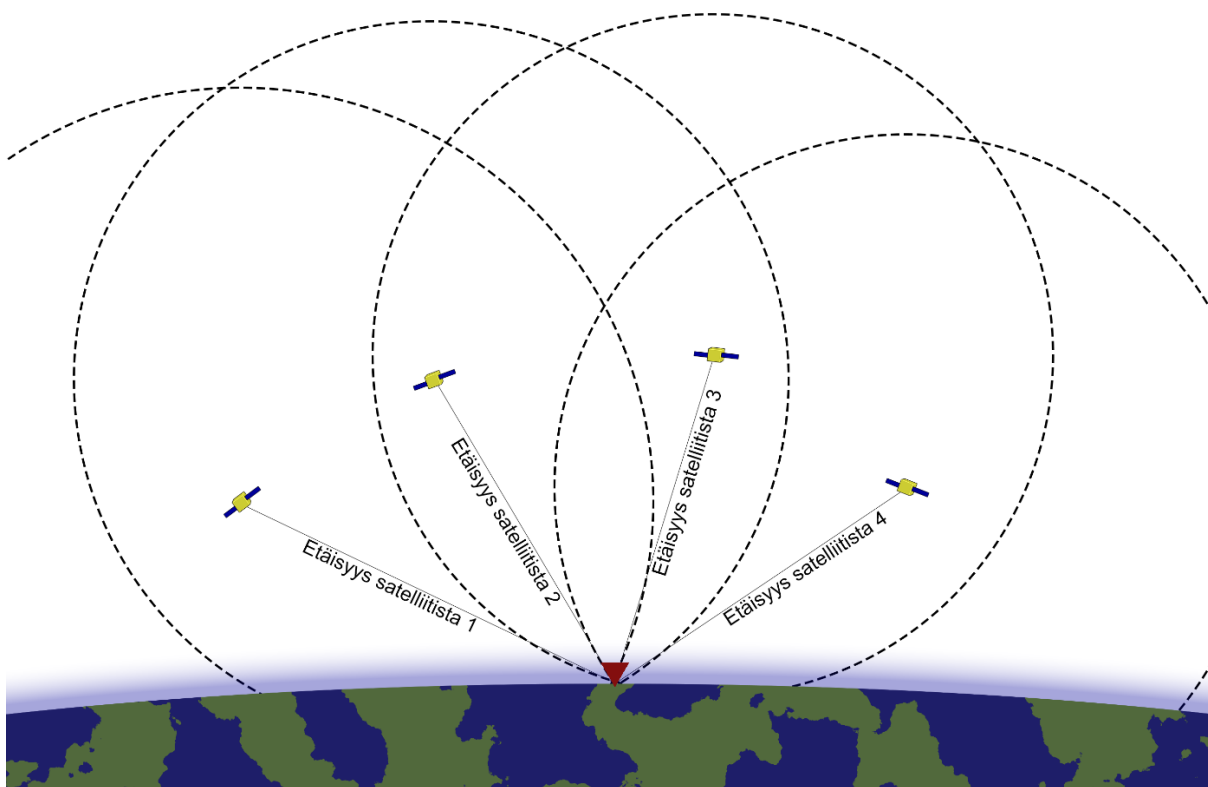
On kuitenkin huomattava, että esiteltyt lennokit eivät luota pelkästään yhden tyyppiseen sensoriin, vaan ne hyödyntävät muitakin sensoreita, joilla mahdollisesti pyritään täydentämään muiden sensoreiden rajoitteita. Toinen vaihtoehto on usean eri sensorijärjestelmän käyttäminen niiden toimintatavan testaamiseen. Esimerkiksi DJI Phantom 4 Pro -lennokissa on teknologialtaan kehittynyt kolmiulotteinen infrapunasensori, jota ei ole enää uudemmassa ja kalliimmassa, ja siten oletettavasti kehittyneemmässä Mavic 2 -lennokissa. Tarkkaa syytä näiden kahden lennokin erilaisiin sensorivalintoihin ei tiedetä, mutta ne voivat johtua lennokkien erilaisesta runkorakenteesta, joka ei esimerkiksi mahdollista joidenkin sensoreiden asentamista tai siitä, että kyseiset sensorit eivät ole tuottaneet haluttua kyvykkyyttä lennokkien valmistuskustannuksiin nähden.

Myös tekoälyn käyttö lennokeissa parantaa sensoreiden käyttöä. Ympäristöään pelkillä kameeroilla tekoälyn avulla tarkkaileva Skydio 2 -lennokki kykenee valmistajan mukaan parempaan autonomiaan kuin kilpaileva DJI Mavic 2 -lennokki, jossa on monimutkaisemmat sensorit. Shield AI Nova -lennokit käyttävät useita sensoreita ja yhdistävät kaiken niiden tuottaman datan tekoälylle, toisin kuin DJI:n lennokit, joissa on erilliset *Vision System* ja *Infrared Sensing System* -järjestelmät ympäristön havainnointiin.

3. SENSORIT JA JÄRJESTELMÄT OMAN SIJAINNIN MÄÄRITTÄMISEEN

Tässä luvussa vastataan alatutkimuskysymykseen ”Mitä sensoreita ja paikantamisjärjestelmiä lennokit käyttävät oman sijainnin määrittämiseen?”. Toimiakseen jollain tapaa autonomisesti, lennokin tarvitsee tietää oma sijaintinsa. Oman sijainnin määrittämiseen on olemassa useita erilaisia ratkaisuja, kuten satelliittipaikannus, inertiajärjestelmät, paikannus kuvantulkintaan perustuen tai hyödyntäen saatavilla olevia radiosignaaleja [24]. Parvessa lennokkien on tiedettävä oman sijaintinsa lisäksi myös muiden parven lennokkien sijainti, jotta lennokkien yhteistoiminta onnistuu. Tämä korostaa tarkan sijaintitiedon hankkimista lennokkiparvissa. Tämän luvun alaluvuissa käsitellään lennokkien käyttämien eri teknologioiden nykytilaa ja tulevaisuutta, sekä arvioidaan niiden käytettävyyttä lennokkiparvissa.

3.1. Satelliittipaikannus



Kuva 8. Satelliittipaikannuksen periaate [62 s. 453].

Satelliittipaikannus on lennokille todennäköisesti halvin ja yksinkertaisin järjestelmä lennokin sijainnin määrittämiseen [24 s. 14]. Satelliittipaikannus perustuu avaruudessa kiertäviin satelliitteihin ja trilateraatioon. Vastaanottimen tietäessä kiertävien satelliittien kiertoratatiedot, eli satelliittien sen hetkisen sijainnin avaruudessa, voi vastaanotin laskea etäisyyteensä kyseisestä satelliitista sen lähettämän aikatiedon perusteella. Vastaanotin tietää tällöin olevansa vain signaalin kulkuajan perusteella lasketun etäisyyden päässä satelliitista. Käytännössä tämä tarkoittaa

taa etäisyyden halkaisijaltaan olevaa ”palloa”, jonka pinnalla vastaanotin sijaitsee. Yhdistämällä tiedot vähintään kolmesta satelliitista, saadaan vastaanottimen sijainti näiden ”pallojen” leikkauspisteestä. [62 s. 452] Paikannussatelliitit lähettävät atomikelloon perustuvaa tarkkaa aikasignaalia sekä satelliittien omaa sijaintia kertovaa dataa, joiden perusteella vastaanottimet kykenevät paikannukseen [61]. Paikannuksen perustuessa tarkkaan aikaan, saadaan myös vastaanottimille tarkka aika eri järjestelmien tarkkaa synkronointia varten [61].

Eri satelliittipaikannusjärjestelmistä neljä tuottaa maailmanlaajuista palvelua. Näistä Yhdysvaltojen GPS ja Venäjän GLONASS ovat täydessä valmiudessa ja Euroopan Unionin Galileo sekä Kiinan BeiDou ovat tarkoitus saada täyteen valmiuteen vuonna 2020 [24; 25; 4]. Galileo-järjestelmä on ollut alustavassa käyttövalmiudessa jo vuodesta 2016 lähtien [59]. Yleisesti kaupallisten satelliittipaikannusjärjestelmien tarkkuus on noin viisi metriä [61]. Satelliittipaikannuksen tarkkuutta laskee epätarkat satelliittien kiertoratatiedot, ilmakehän aiheuttamat vääristymät signaalin kulussa, vaimeneminen ja heijastuminen esimerkiksi puista tai rakennuksista [61].

Satelliittipaikannusjärjestelmien paikannustarkkuutta voidaan parantaa useilla eri tekniikoilla, kuten muun muassa lähettämällä paikannusta tarkentavia tietoja geostationäärisiä satelliitteja, maassa olevia lähetysasemia tai matkapuhelinverkkoja hyödyntäen [24]. Tarkan sijainnin laskeminen vaatii kuitenkin enemmän aikaa, mikä ei ole ideaalia lennokokäytössä, jossa lavetin sijainti voi muuttua nopeastikin. Satelliittipaikannusjärjestelmien paikannustarkkuutta voidaan parantaa lisäksi käyttämällä useaa eri lähetystaajuutta samasta satelliitista, jolloin vastaanottimen on helpompi erottaa ilmakehän aiheuttamat häiriöt samanlaisista signaaleista [28]. Satelliittipaikannusvastaanottimet myös hyötyvät myös usean eri satelliittipaikannusjärjestelmän käytöstä, sillä se mahdollistaa useamman satelliitin datan vastaanottamisen [2]. Eri paikannuksen tarkkuutta parantavien tekniikoiden avulla voidaan päästä jopa 1 senttimerin paikannustarkkuuteen [24]. Tämä mahdollistaa hyvinkin tarkan lennokin oman sijainnin, mikä mahdollistaa tarkan liikkumisen myös muiden lennokkien kanssa.

Koska pääosa satelliittipaikannuksen paikannustarkkuutta parantavista järjestelmistä vaatii jonkin ulkopuolisen palvelun käyttämistä, voi olla yksinkertaisempaa käyttää paikannukseen kahta eri taajuutta. Kahden taajuuden käyttäminen mahdollistaa satelliittisignaalien monitieteenemisestä sekä ionosfääristä aiheutuvien häiriöiden vähentämisen ja siten paikannuksen tarkentamisen [39]. GPS-satelliittipaikannusjärjestelmään lisättiin vuonna 2005 alkaen laukaistuissa satelliiteissa toinen siviilikäyttöön tarkoitettu L2-taajuudella lähetettävä L2C-signaali aiemman L1-taajudella lähetyn C/A-signaalin rinnalle [28]. Toinen siviilisignaali mahdollistaa vastaanottimen käyttäen kahta eri taajuutta parantaen vastaanottimen paikan-

nustarkkuutta. Sama toiminnallisuus on ollut P(Y)-koodia käyttävissä sotilasvastaanottimissa jo paikannusjärjestelmän alusta alkaen [28].

GPS-järjestelmään lisättiin lisäksi 2010 vuodesta alkaen laukaistuihin satelliitteihin kolmas siviilisignaali L5 [28]. Tämä toimii samalla taajuusalueella kuin Galileon E5-signaali. Kuitenkin tammikuussa 2020 vain 12 satelliittia kykeni lähettämään L5-signaalia ja 19 satelliittia L2C-signaalia kaikista 30 avaruudessa olevista GPS-satelliiteista [29]. Galileo-satelliittipaikannusjärjestelmä tukee myös kahden taajuuden käyttöä paikannuksen tarkentamiseen. Galileo käyttää tähän tavallisen E1-taajuudella lähetettävän paikannussignaalin lisäksi E5-taajuudella lähetettävää signaalia [59]. Lisäksi Galileo-järjestelmässä on käytössä E6-taajuudella oleva korkean tarkkuuden signaali, jossa lähetetään muun muassa satelliittien kiertoratojen tarkat tiedot sekä aikakorjauksia [27]. Galileo-järjestelmässä tätä palvelua kutsutaan nimellä *High Accuracy Service*, joka luotiin ilmaiskäyttöön aikaisemman maksulliseksi suunnitellun kaupallisen *Commercial Service* -palvelun tilalle [27]. EU:n mukaan Galileo *High Accuracy Service* mahdollistaa jopa 20 cm paikannustarkkuuden [27].

Kahta vastaanottotaajuutta käyttävät ratkaisut vaativat kuitenkin vastaanottimelta kykyä samanaikaisesti seurata kahta eri taajuutta, mikä on vasta lisääntymässä satelliittipaikannusvastaanottimissa. Yhdysvaltalainen Broadcom toi jo vuonna 2017 markkinoille ensimmäisen kuluttajatuotteisiin tarkoitetun kahta taajuutta sekä GPS-, GLONASS-, Galileo- ja BeiDou-satelliittipaikannusjärjestelmiä tukevan satelliittivastaanotinpiirin [38]. Luvussa 2 esitellyissä lennokeissa, Mavic 2, Phantom 4 Pro, Skydio 2 ja Kespry 2S, on käytössä satelliittipaikannusjärjestelmä oman sijainnin määrittämiseen. Kaikki neljä lennokkia käyttävät yhdistettyä GPS/GLONASS-vastaanotinta [19; 20; 47; 77]. Yksikään kyseisten lennokkien valmistajista ei mainitse lennokkien tukevan Galileo- tai BeiDou-paikannusjärjestelmää tai kaksitaajuusvastaanottoa. Toisaalta Galileo-satelliittipaikannusjärjestelmää hallinnoiva GSA raportoi vuonna 2019, että suuret lennokkivalmistajat, kuten DJI, ovat alkaneet varustamaan lennokkejaan Galileo-järjestelmää tukevilla vastaanottimilla [26]. Tämä todennäköisesti lisää niin Galileon kuin monitaajuusvastaanottimien lisääntymistä lennokeissa tulevaisuudessa.

Satelliittipaikannusjärjestelmien perustuessa vastaanotettuihin signaaleihin, on niitä mahdollista häiritä myös tahallisesti. Häirintä voi pyrkiä peittämään satelliittien lähettämän signaalin, jolloin vastaanotin ei kykene paikantamaan itseään, tai häirinnällä voidaan yrittää lähettää vastaanottimelle harhauttavaa tietoa, jolloin vastaanotin paikantaa itsensä väärään paikkaan. GPS:n L1-signaali, Galileon E1-signaali sekä BeiDoun B1-signaali ovat kaikki samalla taajuudella [81]. Tämä mahdollistaa käytännössä kaikkien näiden kolmen järjestelmän perussig-

naalien lamauttamisen yhdellä häirintälähettimellä. Kuitenkin esimerkiksi useamman taajuuden käyttö voi vaikeuttaa häirintää jonkin verran.

Harhauttavan tiedon varalta Galileo-järjestelmässä on olemassa todentamisominaisuus (*Open Service Navigation Message Authentication, OS NMA*), joka varmistaa tiedon olevan oikeasta satelliitista vaikeuttaen signaalin väärentämistä [59]. Tämän tyyppistä palvelua ei ole muiden järjestelmien kaikille käyttäjille saatavilla olevissa palveluissa. Sotilaskäyttöön tarkoitetut salatut signaalit GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmissä mahdollistavat näissä lähettävän satelliitin tunnistamisen oikeaksi, sillä signaalin väärentäminen vaatisi signaalin salaukseen käytetyn salausavaimen tuntemisen.

3.2. Inertiajärjestelmät

Inertianavigointi perustuu laitteen sijainnin päivittämiseen tunnetusta lähtöpisteestä seuraamalla muutoksia laitteen suunnassa ja nopeudessa. Inertianavigoinnissa tähän käytetään kiihtyvyysantureita ja gyroskooppeja [80 s. 2]. Inertianavigointijärjestelmät ovat hyvin yleisiä erilaisissa sotilas- ja siviili-ilma-aluksissa sekä esimerkiksi ohjuksissa [62 s. 912]. Inertianavigointiin liittyen käytetään koko inertianavigointijärjestelmästä englannin kielistä termiä *Inertial Navigation System (INS)* ja itse inertianavigointisensorista termiä *Inertial Measurement Unit (IMU)* [2].

Inertianavigointisensori koostuu tyypillisesti kolmesta suoraviivaista kiihtyvyyttä mittaavasta kiihtyvyysanturista sekä kolmesta kulmanopeutta mittaavasta gyroskoopista, joiden tiedoilla voidaan seurata muutoksia laitteen sijainnissa sekä asennossa [80 s. 2]. Koska yksi kiihtyvyysanturi mittaa liikettä vain yhdessä suunnassa, käyttämällä kolmea kiihtyvyysanturia, saadaan selville muutokset kolmessa suunnassa, eteen/taakse, sivuille sekä ylös/alas [80 s. 2]. Gyroskoopeilla selvitetään lisäksi kyseisten akseleiden suunnan muutokset [80 s. 2]. Vanhemmat inertianavigointisensorit käyttivät kiihtyvyysantureita ja gyroskooppeja erillisellä vakautetulla alustalla (*stable platform*), joka ei liiku seurattavan kappaleen mukana, vaan säilyy aina samassa asennossa [80 s. 3]. Uudemmat inertianavigointisensorit ovat niin sanottuja suoraan kiinni mitattavassa kohteessa olevia (*strapdown*), jolloin anturit liikkuvat seurattavan kappaleen mukana [80 s. 3]. Strapdown-rakenteella olevat inertianavigointisensorit ovat vakautettuihin verrattuna mekaanisesti yksinkertaisempia ja pienempikokoisia, mutta vaativat enemmän laskentaa sijainnin saamiseksi [80 s. 3].

Inertianavigointisensoreiden käyttämät gyroskoopit voidaan jakaa karkeasti kolmeen päätyyppiin. Mekaaniset gyroskoopit perustuvat vakautettuun pyörivään hyrrään, joka pysyy samassa asennossa, vaikka laite pyörisi, jolloin asennon muutos on mitattavissa vakainten asen-

nosta. Lasergyroskoopit perustuvat laitteen pyörimisliikkeen aiheuttamaan kahden erisuuntaan kiertävän valonsäteen muodostamaan vaihe-eroon, josta on mitattavissa muutos laitteen asennossa. Kolmas gyroskooppi perustuu mikrosysteemeihin, englanninkieliseltä termiltä *microelectromechanical systems (MEMS)*. Mikrosysteemigyroskoopit perustuvat coriolis-ilmiön hyödyntämiseen mittaamalla muutoksia värähtelijän liikkeessä kappaleen liikkeen aikana. [83 s. 9]

Myös käytettävät kiihtyvyysanturit voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin. Mekaaniset kiihtyvyysanturit perustuvat jousen päässä olevaan massaan, jonka liikettä mitataan. Erilaiset puolijohdekiihtyvyysanturit perustuvat valitulla taajuudella värähtelevään värähtelijään (esimerkiksi kvartsikide), jonka värähtelytaajuus muuttuu laitteen liikkuesssa. Myös kiihtyvyysantureita tehdään nykyään mikrosysteemeinä, perustuen joko miniatyyrikoossa olevaan mekaaniseen kiihtyvyysanturiin tai puolijohdetekniikkaan perustuvaan värähtelijään. [83 s. 15]

Itse inertianavigointisensorin suorituskyky ja fyysinen koko riippuvat käytettävistä sensoreista. Esimerkiksi yhdysvaltalainen Honeywell valmistaa kolmen tyyppisiä sotilaskäyttöön tarkoitettuja inertianavigointisensoreita: lasergyroskooppiin perustuvia navigointikäyttöön (*navigation grade*) tarkoitettuja sensoreita, lasergyroskooppiin perustuvia taktisentason (*tactical grade*) sensoreita sekä mikrosysteemeihin perustuvia taktisentason sensoreita [33]. Esimerkit edellä olevista kategorioista ovat HG9900, HG1700 sekä HG1930 inertianavigointisensorit.

Honeywell HG9900 inertianavigointisensori on navigointitarkoitukseen tehty sensori, jossa on kolme lasergyroskoppia (*ring laser gyroscope, RLG*) sekä kolme kvartsivärähtelijään perustuvaa kiihtyvyysanturia [32]. Sensori on mitoiltaan noin 14 cm x 16 cm x 14 cm, sen massa on noin 2,7 kg ja sensorin tehonkulutus on enintään 10 W [32]. Honeywell HG1700 on taktisentason inertianavigointisensori, joka on HG9900-sensoriin verrattuna pienempi (noin 9 cm x 9 cm x 6 cm, massa 0,7 kg) ja kuluttaa tehoa alle 5 W [30]. HG1700 koostuu HG9900-sensorin tapaan lasergyroskoopeista ja kvartsikiihtyvyysantureista [30]. Näiden lisäksi Honeywell valmistaa myös mikrosysteemejä käyttäviä inertianavigointisensoreita, kuten HG1930. HG1930-inertianavigointisensori on kooltaan noin 4 cm x 4 cm x 4 cm, massaltaan 0,16 kg ja kuluttaa tehoa alle 3 W [31]. Edellä esiteltyt Honeywellin inertianavigointisensorit ovat sotilaskäyttöön suunniteltuja tarkoitettu esimerkiksi miehittämättömiin ilma-aluksiin, ohjuksiin tai muihin hakeutuviin ampuatarvikkeisiin [30].

Edellä esiteltyt inertianavigointisensorit ovat suurikokoisia sekä paljon tehoa kuluttavia. Pienissä lennokeissa on todennäköisesti jokin yksinkertaisempi inertianavigointisensori, kuten esimerkiksi saksalaisen Bosch Sensortec yrityksen valmistama BMI088. Bosch BMI088 on

valmistajan mukaan erityisesti pieniin lennokkeihin ja robotiikkaa hyödyntäviin kodinkoneisiin suunniteltu inertianavigointisensori [6]. BMI088-sensorin mitat ovat 3 mm x 4,5 mm x 0,95 mm ja sen tehonkulutus on alle 20 mW [6]. BMI088 on siis edellä esiteltyihin Honeywellin inertianavigointisensoreihin verrattuna huomattavasti pienempi ja vähemmän tehoa kuluttava.

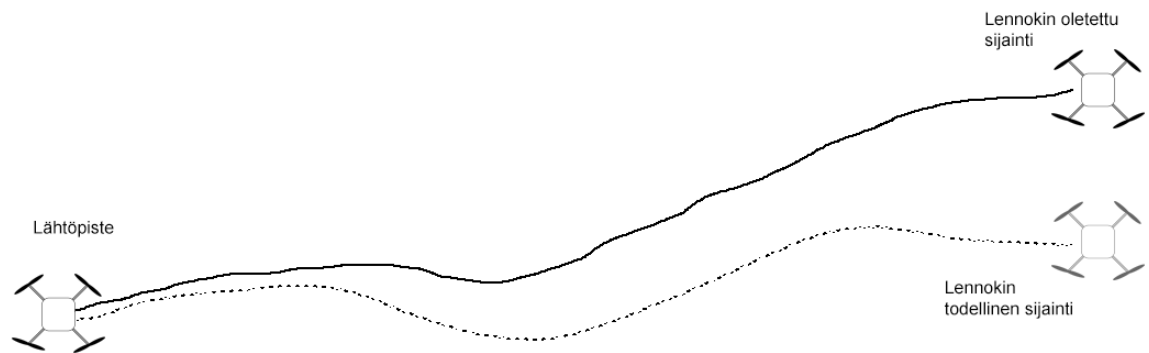
Inertianavigointisensorin pieni koko ja tehonkulutus vaikuttavat sensorin suorituskykyyn ja sensorin tuottamaan paikannusvirheeseen. Inertianavigointisensoreiden virheet koostuvat gyroskoopille ja kiihtyvyysantureille tyypillisistä virheistä, lämpötilan aiheuttamista virheistä, kalibroinnin aiheuttamista virheistä sekä satunnaisesta gyroskoopin tai kiihtyvyysanturin tyypistä riippuvasta virheestä [80 s. 73; 83 s. 10-17]. Näistä kolme ensimmäistä ovat systemaattisia ja ne on mahdollista kompensoida inertianavigointisensorin kalibroinnilla [80 s. 73]. Tyypillisestä virheestä käytetään termiä ”*turn-on bias*” ja satunnaisesta virheestä termiä ”*in-run bias*” [2 s. 11]. Näiden lisäksi satunnaista virhettä aiheuttaa esimerkiksi kohina, joka muodostaa gyroskoopeissa satunnaista kulmamuuutosta (*angular random walk, ARW*) tai kiihtyvyysantureissa satunnaista nopeudenmuutosta (*velocity random walk, VRW*) [2 s. 12].

Esimerkiksi aikaisemmin esitellyn Honeywell HG9900 navigointitason inertianavigointisensorin turn-on bias on 0,003 °/h gyroskoopeille ja 0,025 mg (*milli g*) kiihtyvyysantureille, ja in-run bias on 0,0006 °/h gyroskoopeille ja 0,010 mg kiihtyvyysantureille [33]. Saman valmistajan HG1700 taktisentason inertianavigointisensorilla turn-on bias on 1 °/h ja 1 mg, ja in-run bias 0,25 °/h ja 0,05 mg [33]. Pienikokoisempi ja vähemmän tehoa kuluttava HG1700 on siis HG9900-inertianavigointisensoriin verrattuna epätarkempi. Sama voidaan todeta myös esiteltyjen mikrosysteemeihin perustuvien sensoreiden kohdalla. Honeywell HG1930 turn-on bias arvot ovat 20 °/h ja 5 mg, ja in-run bias arvot 1 °/h ja 0,3 mg [33]. Bosch BMI088 sensorin turn-on bias on 1 °/s eli 3600 °/h ja 30 mg [6]. BMI088-sensorin in-run bias gyroskoopille on valmistajan mukaan alle 2 °/h, mutta kiihtyvyysantureille valmistaja ei anna arvoa [6]. Olettaen BMI088-sensorin tarkkuuksien seuraavan Honeywell HG1930-sensorin arvoja samassa suhteessa, voidaan arvioida BMI088-sensorin kiihtyvyysanturien in-run bias arvon olevan $30 \text{ mg} * 0,3 \text{ mg} / 5 \text{ mg} = 1,8 \text{ mg}$. Huomataan, että pienempi BMI088-inertianavigointisensori on HG1930-inertianavigointisensoria epätarkempi. Edellä esiteltyjen inertianavigointisensoreiden tekniset tiedot on koostettu taulukkoon 4.

Sensori	Honeywell HG9900	Honeywell HG1700	Honeywell HG1930	Bosch BMI088
Tekniikka	lasergyroskooppi kvartsikiihty- vyysanturi	lasergyroskooppi kvartsikiihty- vyysanturi	MEMS	MEMS
Mitat	14 cm x 16 cm x 14 cm	9 cm x 9 cm x 6 cm	4 cm x 4 cm x 4cm	0,3 cm x 0,45 cm x 0,095 cm
Massa	2,7 kg	0,7 kg	0,16 kg	Ei mainittu
Tehonku- lutus	10 W	5 W	3 W	0,02 W
Turn-on bias	0,003 °/h 0,025 mg	1 °/h 1 mg	20 °/h 5 mg	3600 °/h 30 mg
In-run bias	0,0006 °/h 0,01 mg	0,25 °/h 0,05 mg	1 °/h 0,3 mg	2 °/h 1,8 mg (arvioitu)
Laskettu virhe t = 60 s	0,18 m	0,88 m	5,30 m	31,8 m

Taulukko 4. Eri inertianavigointisensoreiden arvoja

Inertianavigointijärjestelmät toimivat periaatteessa itsenäisesti, eli ne eivät ole riippuvaisia esimerkiksi ulkoisista signaaleista [80 s. 3]. Inertianavigointijärjestelmät tarvitsevat kuitenkin tarkan tiedon järjestelmän alkuperäisestä sijainnista, johon inertianavigointisensorin mittamat muutokset ovat lisättävissä [80 s. 3]. Lisäksi edellisessä kappaleessa todetut epätarkkuudet aiheuttavat virhettä paikannuksessa. Koska kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien tuottamat arvot integroidaan tunnettuun sijaintiin, alkavat sensoreiden virheet kertaautua inertianavigointijärjestelmässä [83 s. 23-24]. Tämä aiheuttaa inertianavigointijärjestelmän laskeman paikan muuttumisen epätarkemmaksi, mitä kauemmin inertianavigointijärjestelmä on käynnissä.



Kuva 9. Inertianavigoinnin epätarkentuminen

Esimerkiksi kiihtyvyyssanturien virhettä voi arvioida kaavalla $s(t) = \epsilon \times t^2 \div 2$, jossa ϵ on kiihtyvyyden virhe yksikössä m/s^2 ja t mittaukseen käytettävä aika sekunneissa [83 s. 15]. Laskemalla hyödyntäen aikaisemmin esiteltyjen inertianavigointisensoreiden *in-run bias* -arvoja, saadaan arvioitua kyseisten sensoreiden sijainnin tarkkuus halutun ajan hetken kuluttua, olettaen, että *turn-on bias* on sensoreista kalibroitu pois. Laskennalla voidaan todeta, että 60 sekunnin inertiasurannan jälkeen Honeywell HG9900-inertianavigointisensorin virhe sijainnissa on noin 18 cm kun taas Bosch BMI088-inertianavigointisensorilla se on jo 31,8 metriä.

Yleinen tapa korjata inertiaipaikannusjärjestelmien eksymistä on päivittää inertiaipaikannusjärjestelmän sijainti esimerkiksi satelliittipaikannusjärjestelmästä saatavan sijainnin avulla [83 s. 33]. Näin voidaan yhdistää inertiaipaikannusjärjestelmän lyhyen aikavälin tarkka sijaintitieto sekä satelliittipaikannusjärjestelmän pitkällä aikavälillä tarkempi sijaintitieto [2 s. 11]. Näiden lisäksi inertiaipaikannusjärjestelmät tuottavat laitteelle tiedon myös sen suunnasta, mitä ei saada suoraan esimerkiksi satelliittipaikannusjärjestelmästä [2 s. 11]. Toinen tapa korjata inertiaipaikannusjärjestelmän virhettä on yhdistää siihen muita sensoreita, kuten magnetometri, jolla on mahdollista seurata maan magneettikenttiä [83 s. 33]. Tämä ei kuitenkaan satelliittipaikannuksen tavoin mahdollista tarkan sijainnin määrittämistä, mutta säilyttää kuitenkin sensorin itsenäisyyden ulkopuolisista signaaleista [83 s. 33]. Satelliittipaikannus toimii myös huonosti esimerkiksi sisätiloissa [83 s. 33]. Pienet lennokit kykenevät mahdollisesti hyödyntämään sisätilanavigoinnissa inertianavigoinnin apuna luvussa 2 esiteltyjä ympäristön havainnointiin käytettäviä sensoreita.

Luvussa 2 esitellyistä lennokeista inertianavigointisensorin olemassaolo mainitaan DJI Phantom 4 Pro ja Mavic 2 -lennokeissa sekä Shield AI:n Nova ja Nova 2 -lennokeissa. Käytettävän sensorin mallia ja tyyppiä ei mainita yhdenkään lennokin kohdalla, mutta on oletettavissa sen

olevan pieni ja vähän tehoa kuluttava, esimerkiksi edellä mainitun Bosch BMI088-sensorin kaltainen. Edellä mainituissa lennokeissa on rajoitettu kuorman kantokyky ja virrantuotto. Lisäksi varsinkin DJI:n lennokkien kykenemättömyys autonomiseen toimintaan ilman satelliittipaikannusta ei vaadi erityisen tarkkaa inertipaikannussensoria. Shield AI Nova-lennokeissa taas on muita sensoreita, joilla se kykenee paikantamaan itsensä ja tukemaan inertianavigointijärjestelmän toimintaa. Shield AI Nova 2 -lennokissa on valmistajan mukaan kahdennetut inertianavigointisensorit [74]. Kahdennetuilla inertianavigointisensoreilla voidaan pyrkiä luomaan taistelunkestävyyttä tai pyrkiä tarkentamaan paikannusta. Kespry 2S ja Skydio 2 -lennokkien valmistajat eivät ilmoita lennokkien käyttävän inertianavigointisensoreita, mikä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö niitä olisi kyseisissä lennokeissa.

Edellä kuvattu 2,7 kg painava ja enintään 10 W tehoa kuluttava navigointitason HG9900-inertiapaikannussensori on todennäköisesti liian painava ja energiaa kuluttava soveltuvaksi pieneen noin 1,4 kg painavaa DJI Phantom 4 Pro -lennokkiin, jonka akkukapasiteetti on noin 89 Wh. Toisaalta siviilikäyttöön suunniteltujen pienten lennokkien ei välttämättä tarvitse säilyttää omaa tarkkaa sijaintia inertipaikannusjärjestelmillä pitkiä aikoja, sillä niillä on pääsääntöisesti mahdollisuus satelliittipaikannukseen, jolloin epätarkempi, pienikokoinen ja vähän tehoa kuluttava BMI088-inertianavigointisensori on todennäköisesti aivan riittävä. Toisaalta mahdollisesti sotilaskäytössä olevat lennokkiparvet saattavat joutua toimimaan alueella, jossa esimerkiksi satelliittipaikannusjärjestelmiä häiritään, jolloin tarkemmasta inertianavigointisensorista olisi hyötyä tai lennokkien tarkka paikka pitäisi selvittää muilla keinoilla.

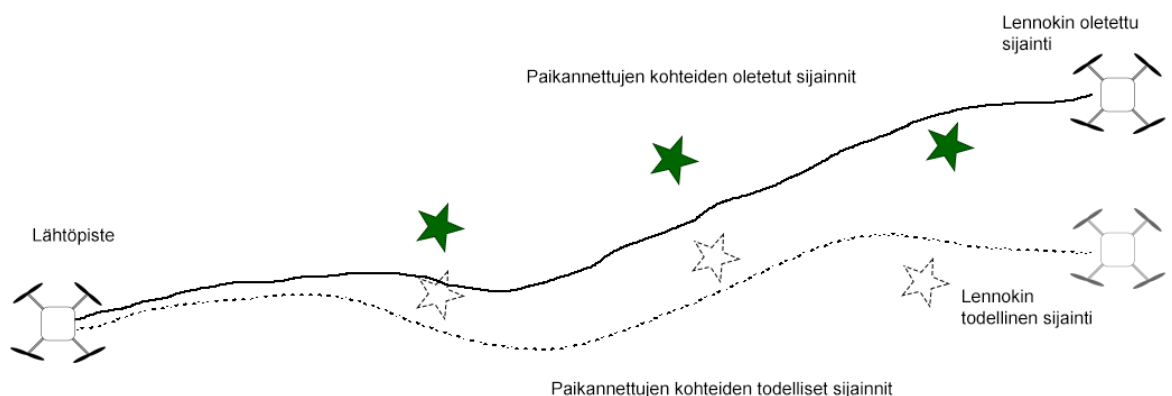
3.3. Kuvantunnistus

Kuvantunnistusta sotilaskäytössä on käytetty esimerkiksi yhdysvaltalaisen Tomahawk-risteilyohjuksen yhtenä suunnistusmenetelmänä [40 s. 250]. Tomahawk-risteilyohjus toimii hyvänä vertailukohtana itsenäisesti toimiviin lennokkeihin, sillä se on itsenäisesti kohteeseen suunnistava asejärjestelmä. Tomahawk-risteilyohjuksen tapauksessa käytettävä kuvantunnistus (*digital scene matching area correlator, DSMAC*) käyttää ennen ohjuksen laukaisua ohjukseen ladattua ilmakuviin perustuvaa karttaa ohjuksen suunnitellulta reitiltä [40 s. 250]. Tomahawk-risteilyohjus pyrkii paikantamaan itsensä vertaamalla oman kameransa ottamia kuvia ohjukseen tallennettuun karttaan, ja näin päivittämään inertianavigointijärjestelmälle ohjuksen tarkan sijainnin [40 s. 250].

Tomahawk-risteilyohjuksen yhteydessä kuvantunnistus perustuu oikein valittuihin reittipisteisiin, sillä ympäristössä voi tapahtua muutoksia kuvien ottamisen jälkeen, kuten valaistusolosuhteiden muuttuessa [40 s. 250]. Samankaltaista ilmakuviin perustuvaa kuvantunnistussuunnistusta on myös tutkittu autonomisesti lentävien lennokkien käytössä onnistuneesti jo vuonna

2008 [13]. Kuvantunnistus voi toimia lennokkien apuna, silloin kun ne menettävät satelliittipaikannusjärjestelmän käytöstä esimerkiksi tilanteissa, joissa satelliittipaikannusjärjestelmät toimivat huonosti, kuten kaupungeissa ja sisätiloissa, tai häirinnän takia. Lennokin hyötykuormana olevaa kameraa voidaan käyttää myös seuraamaan muita kohteita kuin ilmakuviin perustuvia maastonmuotoja [43]. Lennokki pystyy esimerkiksi määrittämään oman sijaintinsa sisätiloissa vertaamalla omia reitiltä ottamiaan kuviaan muistiin tallennettuihin kuviin lennokin suunnitellulta reitiltä [14]. Nämä teknologiat perustuvat kuitenkin ennalta lennokille määritettyihin kuviin.

Autonomisten robottien yhteydessä on myös mahdollista hyödyntää samanaikaisen paikantamisen ja kartoittamisen periaatetta (*simultaneous localization and mapping, SLAM*) [21 s. 99]. Kyseistä periaatetta hyödyntäen esimerkiksi lennokki voi samanaikaisesti paikantaa itsensä hyödyntäen ympäristössä olevia kiintopisteitä ja samalla luoda kartan ympäristöstä jatkokäyttöä varten [21 s. 99]. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että lennokin sijainti ei ole välttämättä täysin tarkka, jolloin myöskään havaitun ja mitatun kiintopisteen sijainti ei ole täysin tarkka [21 s. 100]. Tällöin lennokin luoma kartta ympäristöstä tulee epätarkemmaksi, mitä kauemmin lennokki kartoittaa ilman tarkkaa oman sijainnin päivitystä, johtuen aikaisemmin kuvatuista inertiaipaikannuksen ongelmista. Tämä on kuvattu kuvassa 10. Tämä voidaan osittain korjata lennokin kiertäessä reitin takaisin lähtöpisteeseensä, jolloin se voi laskea ja korjata virheet tehdyssä kartassa, parantaen luodun kartan laatua ja korjaten samalla inertianavigoinnin eksymää [72].



Kuva 10. Samanaikaisen paikannuksen ja kartoituksen perusongelma.

Käytettävien sensoreiden mukaan SLAM-tekniikka voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, suuntaan (*bearing only SLAM*) tai etäisyyteen (*range only SLAM*) perustuvaan sensoriin [72]. Suuntaan perustuvat sensorit antavat suunnan kohteeseen, kuten tavallinen kamera, joka ei

kykene suoraan antamaan etäisyystietoa [72]. Etäisyyteen perustuvat sensorit antavat etäisyyden kohteeseen [72]. Käytettäessä kameroita stereoasettelussa, saadaan sekä suunta, että etäisyys kohteista [72]. Periaatteessa paikannukseen ja kartoitukseen voidaan käyttää siis kameroiden lisäksi myös muita luvussa 2 esiteltyjä esteiden havaitsemiseen käytettäviä sensoreita. Kuvantunnistusta on myös mahdollista käyttää parveilutarkoituksessa seuraamaan myös muiden lennökkien sijaintia ympäristön ja sijainnin seuraamisen ohessa [78].

Luvussa 2 esiteltyt lennokit eivät valmistajien mukaan käytä kuvantunnistusta lennokin paikantamiseen. DJI Phantom 4 Pro ja Mavic 2 -lennokit hyödyntävät kamerajärjestelmiään käytännössä vain esteiden väistämiseen ja lennokin pitämiseen paikallaan leijunnassa tilanteissa, joissa satelliittipaikannus ei ole saatavilla [19; 20]. Kespry 2S käyttää sijaintinsa määrittämiseen vain tarkkaa satelliittipaikannusta, vaikka kyseistä lennokkia käytetäänkin maanmittaus-tarkoituksiin [23]. Skydio 2 käyttää kamerajärjestelmäänsä käytännössä esteiden väistämiseen ja autonomiseen lentoon, mutta sijainnin määrittämiseen Skydio 2 käyttää edelleen vain satelliittipaikannusta [77].

Edellä mainitut siviilikäyttöön tarkoitetut lennokit siis luottavat satelliittipaikannukseen oman sijainnin määrittämisessä. Kuitenkin yhdysvaltalaisen Shield AI -yrityksen Nova-lennokki on suunniteltu toimimaan myös ympäristöissä, joissa satelliittipaikannus ei ole käytössä, kuten sisätiloissa [74]. Kuten luvussa 2 mainittiin Nova hyödyntää esteiden tunnistukseen kameroita, lidar-sensoria ja ultraäänisensoria. Nova pystyy hyödyntämään näitä sensoreita myös paikantaakseen itsensä ja luodakseen kartan ympäristöstään [75]. Lennokki käyttää luomaansa karttaa oman suunnistamisen apuna sekä tuottaa sen myös lennokin ohjaajalle tiedustelutietona [73].

DJI:n valmistamille lennokeille on olemassa myös kolmannen osapuolen valmistamia ohjelmistoja, jotka mahdollistavat lennökkien käyttämisen ilmakuvaukseen sekä 3D-mallin luontiin ympäristöstä [66 s. 71]. Käytännössä nykyisissä pienissä lennokeissa on olemassa tarvittavat sensorit kuvantunnistukseen perustuvan suunnistusjärjestelmän toteuttamiseen. Kyseisiä lennokkeja käytetään kuitenkin pääasiassa ulkona, jolloin satelliittipaikannusjärjestelmät ovat käytössä, eikä lennokeilla ole tarvetta kyetä toimimaan ilman sitä. Sotilaskäyttöön suunniteltu Shield AI Nova kuitenkin on suunniteltu toimimaan autonomisesti sisätiloissa ilman satelliittipaikannusta apuna [74]. Se käyttää käytännössä samoja sensoreita kuin muutkin aikaisemmin esiteltyt lennokit, mutta luo niiden datasta kuitenkin kartan, jota kykenee käyttämään suunnistuksen apuna. Nova-lennokin järjestelmät valmistajan mukaan kuitenkin keskittyvät sisätiloihin, eikä valmistaja lupaa mitään lennokin autonomisesta toiminnasta ulkona [74].

Ilmakuviin perustuva navigointi on mahdollista lennokeissa, mikä toisaalta vaatii lennokille etukäteen ilmakuvat alueesta. Periaatteessa tämä olisi mahdollista esimerkiksi erilaisista internetin karttapalveluista, kuten Google Maps-palvelusta. Myös Google StreetView-palvelun kuvadataa voisi mahdollisesti käyttää suunnistuksen apuna kaupunkiympäristössä [50]. Suomessa Maanmittauslaitoksen tuottama avoimena datana julkaistu ilmakuvista tehty geometrialtaan karttaa vastaava ortokuva-aineisto on tarkkuudeltaan huonoimmillaan kaksi metriä [60]. Tällainen tarkkuus mahdollisesti riittäisi esimerkiksi huonommankin inertianavigointijärjestelmän paikantamisen takaisin lähemmäksi oikeaa sijaintia. Kuvantunnistus on kuitenkin laskennallisesti vaativampaa kuin esimerkiksi satelliittipaikannus sekä vaatii joko etukäteen tallennetut kuvat alueelta tai esimerkiksi datayhteyden, jonka kautta lennokkien olisi mahdollista hankkia tarvittavat kuvat tarpeensa mukaan. Toisaalta lennokin tehdessä itse karttaa alueesta, täytyy lennokin pystyä tallentamaan tarvitsemansa data omaan muistiin, mikä luonnollisesti lisää järjestelmän monimutkaisuutta.

3.4. Radiosignaalit (signals of opportunity)

Radiosignaaleihin perustuva paikannus perustuu muiden kuin paikannukseen tarkoitettujen radiosignaalien käyttämistä paikannukseen. Englanniksi tästä käytetään termiä *signals of opportunity* [50]. Tällaisia radiosignaaleja ovat esimerkiksi televisio-, yleisradio-, Wi-Fi- ja matkapuhelinsignaalit sekä satelliittitiedonsiirtoon käytettävät signaalit [45 s. 111]. Yksikään aikaisemmin esitellyistä lennokeista ei valmistajien tietojen mukaan käytä muita radiosignaaleja paikannukseen kuin satelliittipaikannusta.

Televisiosignaaleita lähetetään VHF- ja UHF-taajuusalueilla ja niissä käytetään satelliittipaikannussignaaleihin verrattuna suurta lähetystehoja ja laajaa kaistanleveyttä (6-8 MHz), joka vähentää monitie-etenemisestä aiheutuvia haittoja [44 s. 378]. Kuitenkaan televisiosignaaleissa ei ole aikatietoa, mikä vaikeuttaa signaalien hyödynnettävyyttä paikannukseen [44 s. 378]. Suomessa Liikenne- ja viestintävirasto Traficom ylläpitää listaa luvanomaavista televisioasemista, mistä löytyy esimerkiksi asemien käyttämät kanavat, taajuudet, lähetysteho sekä koordinaatit [56]. Suomessa televisioasemat käyttävät VHF-taajuuksia välillä 177,5-225,5 MHz ja UHF-taajuuksia välillä 470-694 MHz [56].

FM-modulaatiota käyttävissä yleisradiolähetyksissä on myös suuri lähetysteho, mutta signaalin kaistanleveys on kapeampi, jolloin monitie-eteneminen voi aiheuttaa ongelmia [44 s. 378-379]. Kuten televisiosignaaleissa, ei myöskään FM-yleisradiosignaaleissa ole helpon paikannuksen mahdollistavaa aikatietoa [44 s. 379]. Kuten televisioasemista, Traficom ylläpitää myös listaa luvansaaneista radioasemista Suomessa pitäen sisällään samat tiedot kuin televi-

sioasemista [55]. Suomessa FM-radioasemat toimivat VHF-taajuuksilla välillä 87,5-108 MHz [55].

Langattomien lähiverkkojen 802.11 Wi-Fi-signaaleita on paljon esimerkiksi rakennetuilla alueilla, mutta Wi-Fi-signaalien kantama on lyhyt [44 s. 379]. 802.11n- ja 802.11ac-protokollia noudattavat Wi-Fi verkot käyttävät 2,4 GHz ja 5 GHz taajuuksia [3]. Suomessa näille verkoille sallitut taajuusalueet ovat 2400-2483,5 MHz, 5150-5350 MHz ja 5470-5725 MHz [54 s. 10]. Näistä 5150-5350 MHz taajuusalue on sallittu käytettäväksi vain sisätiloissa [54 s. 10].

Matkapuhelinsignaaleita lähettäviä tukiasemia on paljon varsinkin rakennetuilla alueilla, mutta esimerkiksi GSM-signaalien matala lähetysteho ja kapeakaistanleveys vaikeuttavat matkapuhelinsignaalien käytettävyyttä [44 s. 379]. Toisaalta LTE-signaaleissa on leveämpi kaistanleveys, joka parantaa niiden käytettävyyttä paikannukseen [45 s. 113]. Suomessa GSM-, UMTS- ja LTE verkot voivat käyttää 880-915 MHz ja 1710-1785 MHz taajuusalueita [54 s. 4]. Näiden lisäksi UMTS- ja LTE-verkot voivat käyttää 1920-1980 MHz taajuusalueita sekä pelkästään UMTS-verkot taajuusaluetta 1900-1920 MHz [54 s. 4]. Eri signaalilähteiden käytettävissä olevat taajuusalueet on koostettu taulukkoon 5.

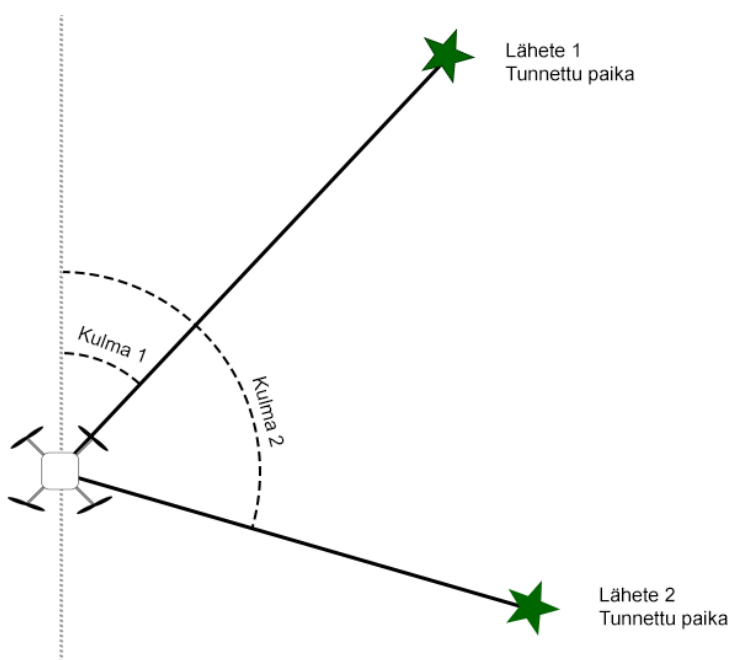
Signaalilähde	FM-radiot	Televisiosignaalit	Matkapuhelinverkot	Wi-Fi
Taajuusalueet (MHz)	87,5 - 108	177,5 - 225,5 470 - 694	880 - 915 1710 - 1785 1900 - 1980	2400 - 2483,5 5150 - 5350 5470 - 5725

Taulukko 5. Eri signaalilähteiden käyttämät taajuudet

Kuten satelliittipaikannusjärjestelmien yhteydessä todettiin, satelliittipaikannusjärjestelmät lähettävät tarkan atomikelloon perustuvan ajan sekä satelliitin sijainnin. Muissa kuin paikannukseen tarkoitetuissa signaaleissa ei välttämättä ole tarkkaa lähettimen sijaintia tai lähetysaikaa [64]. Kuten aikaisemmin todettiin, Traficom ylläpitää listaa Suomessa toimivista televisio- ja FM-radioasemista sijainteineen. Wi-Fi- ja matkapuhelinverkkojen yhteydessä voidaan hyödyntää esimerkiksi eri yritysten, kuten Googlen, keräämiä tietoja tukiasemien sijainneista [44 s. 379]. 802.11 Wi-Fi-verkot eivät ole kuitenkaan minkään viranomaisen valvomia, toisin kuin televisio- ja FM-radioverkot, jolloin niiden sijainnit ja ominaisuudet voivat muuttua nopeastikin, tehden verkoista kerätyn tietokannan epäluotettavaksi. Toinen vaihtoehto on käyttää luvussa 3.3 käsiteltyä samanaikaisen paikantamisen ja kartoituksen periaatetta, jolloin lenno-

kit toimiessaan alueella kartoittavat sen käyttökelpoiset radiolähteet samalla paikantaen itsensä.

Paikannus radiosignaaleista perustuu neljään eri tapaan: signaalin tulosuuntaan (*Angle of Arrival, AOA*), tuloaikaan (*Time of Arrival, TOA*), tuloaikojen eroon (*Time Difference of Arrival, TDOA*) ja signaalin vahvuuteen (*Received Signal Strength, RSS*) [44]. Tulosuuntaan (*Angle of Arrival, AOA*) perustuvassa paikannuksessa vastaanottimessa on useasta elementistä muodostuva antenni, jonka avulla vastaanotin kykenee laskemaan vastaanotetun signaalin suunnan [44 s. 380]. Vastaanotin kykenee laskemaan oman sijaintinsa käyttämällä triangulatiota, kun se tietää suunnat kahteen tunnettuun pisteeseen [44 s. 380]. Periaate on siis sama kuin suuntimoantennilla suuntimisessa, mutta päinvastainen. Kuitenkin suuntaan perustuvan paikannuksen tarkkuus huononee etäisyyden kasvaessa lähettimestä, mitatun kulman muodostaessa suuremman virheen [44 s. 380]. Koska signaalin tulosuuntaan perustuva paikannus ei tarvitse signaalin sisältävän tietoa sen lähetysajasta, on menetelmä käyttökelpoinen kaikkien havaittavien signaalien kanssa. Havainne kuva tulosuuntaan perustuvasta paikannuksesta on kuvassa 11.

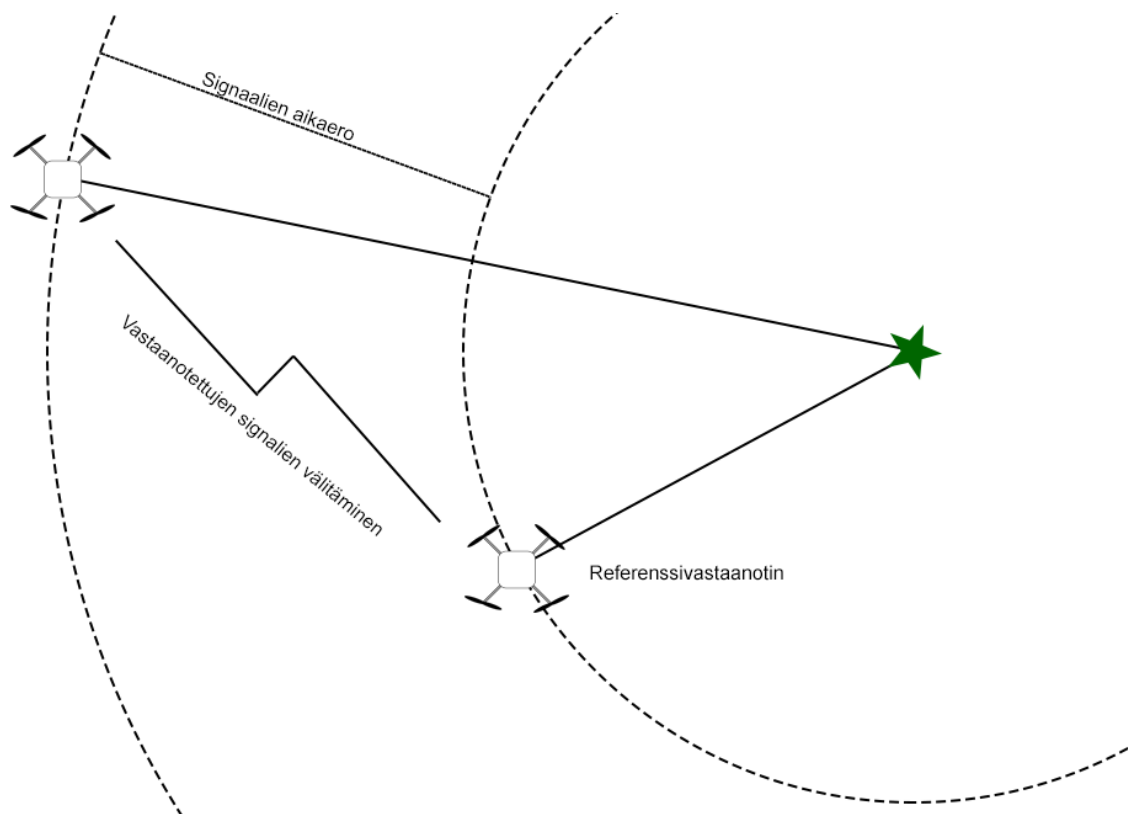


Kuva 11. Tulosuuntaan perustuva paikannus

Tuloaikaan (*Time of Arrival, TOA*) perustuva paikannus perustuu signaalin kulkuajan perusteella laskettuun etäisyyteen signaalilähteestä [44 s. 380]. Vastaanotin tietää tällöin olevansa etäisyyden pituisen säteen omaavan pallon pinnalla lähettimestä [44 s. 380]. Tuloaikaan perustuva paikannus noudattaa siis samaa periaatetta kuin jo aikaisemmin käsitelty satelliittipaikannus. Tämä vaatii luonnollisesti signaalin, jossa on signaalin lähetysaika. Myöskään eri

lähettimien, kuten tukiasemien, kelloja ei ole välttämättä synkronoitu keskenään, mikä vaikeuttaa paikannusta [44 s. 380]. LTE-tukiasemien lähettämistä signaaleista on mahdollista laskea kyseisen signaalin lähetysaika ja siten käyttää signaaleja paikannukseen [45].

Tuloaikojen eroon (*Time Difference of Arrival, TDOA*) perustuva paikannus käyttää vähintään kahta toisistaan erillään olevaa vastaanotinta, jotka vastaanottavat saman lähetyksen [63]. Toinen vastaanottimista on ensisijainen, paikannuksen tekevä vastaanotin, ja toinen on puolestaan vertausarvon tuottava referenssivastaanotin [63]. Vastaanottimien vastaanottaessa signaalin, lähettää referenssivastaanotin tietonsa vastaanotetusta signaalista paikannuksen tekevä vastaanottimelle jotain viestiyhteyttä hyödyntäen [63]. Paikannuksen tekevä vastaanotin kykenee tällöin kahden vastaanottimen tietojen perusteella laskemaan signaalin tuloaikojen aikaeron [63]. Paikannus yhdestä lähettimestä aikaerojen kanssa vaatii lähettimen ja referenssivastaanottimen sijainnin tuntemisen [63]. Paikannus on mahdollista myös tuntematta vastaanottimien sijainteja, mutta tämä vaatii useamman lähettimen, joista aikaero lasketaan [63]. Paikannus onnistuu myös käänteisesti, eli tunnetuissa sijainneissa olevat vastaanottimet, pysyvät laskemaan sijainnin tuntemattomassa sijainnissa olevalle lähettimelle [63]. Tämä mahdollistaa esimerkiksi lähettimien paikantamisen ja kartoittamisen, silloin kun vastaanottimilla on esimerkiksi satelliittipaikannus käytettävissä oman sijainnin tarkkaan määrittämiseen. Paikannus vaatii myös vastaanottimien kellojen olevan samassa ajassa [63]. Tuloaikojen eroon perustuva paikannus ei vaadi vastaanotettavan signaalin lähetysajan tuntemista [44]. Tämä mahdollistaa tekniikan käytön käytännössä mille tahansa signaalille. Toisaalta paikannus vaatii vastaanottimien vastaanottaman datan jakamista, mikä vaikuttaa lennokkien tiedonsiirtokapasiteettiin sekä tehon kulutukseen [44]. Havainne kuva tuloaikojen eroon perustuvasta paikannuksesta on kuvassa 12.



Kuva 12. Tuloaikojen eroon perustuva paikannus.

Signaalin vahvuuteen (*Received Signal Strength, RSS*) perustuvassa paikannuksessa vastaanotin laskee vastaanottamansa signaalin vastaanottotehon perusteella etäisyyden lähettimeen [44 s. 381]. Tämä perustuu signaalin vaimenemisen mallintamiseen, ja vaatii siten tiedon lähettimen sijainnista, lähetystehosta, antennin suuntaavuudesta sekä arvion vaimenemiseen vaikuttavista tekijöistä signaalin kulun aikana [44 s. 381]. Signaalin vahvuusarvoja hyödyntäen on myös mahdollista luoda kartta, joka pitää sisällään vain mitattujen vahvuusarvojen sijainnit ilman laskettua etäisyyttä, jolloin vastaanotin kykenee paikantamaan itsensä karkeasti kyseistä karttaa hyödyntäen [44 s. 381]. Koska signaalin vaimenemismallit tuottavat arvioita, ei tarkkuus signaalin vahvuuteen perustuvalla paikannuksella ole hyvä [44 s. 381]. Signaalin vahvuuteen perustuva paikannus on yleistä varsinkin Wi-Fi-signaalien yhteydessä [44 s. 379]. Signaalin vahvuuteen perustuvaa paikannusta voidaan käyttää myös lennokkiparven sisällä lennokkien välisten etäisyyksien säilyttämiseksi [76]. Periaatteessa signaalin vahvuuteen perustuvaa paikannusta olisi mahdollista käyttää Suomessa myös hyödyntäen aikaisemmin mainittuja Traficomien julkaisemia tietokantoja televisio- ja FM-radioasemista, kyseisten tietokantojen pitäen sisällään lähettimien sijainnit ja lähetystehot, joista on mahdollista laskea signaalin vaimeneminen.

Signaalin tulosuuntaan perustuva paikannus vaatii muihin paikannusmenetelmiin verrattuna useasta antennielementistä koostuvan antennin, joka on suurempi kuorma yksittäiselle len-

nokille. Myös VHF-taajuusalueilla toimivat FM-radiosignaalit ja televisiosignaalit vaativat korkeampiin taajuusalueisiin verrattuna suuremmat antennit, muodostaen suuremman kuorman lennokille, heikentäen kyseisten signaalien käytettävyyttä paikannukseen lennokeissa. Signaalien kulkuaikaan perustuva paikannus vaatii signaalin lähetysajan signaalissa, eikä siten toimi kaikilla mahdollisilla signaaleilla. Kuitenkin esimerkiksi pelkillä LTE-signaaleilla on mahdollista saada alle 10 metrin paikannustarkkuus sekä parantaa paikannuksen tarkkuutta käyttäessä GPS-paikannusta sekä LTE-signaaleihin perustuvaa paikannusta yhdessä [45]. Useamman vastaanottimen vaatima signaalien tuloaikojen eroon perustuva paikannus voi olla hyvinkin käyttökelpoinen useasta lennokista koostuvassa parvessa, jossa jokaiseen lennokkiin voi kuulua tarvittava vastaanotin ja lennokkien muutenkin välittäessä tietoa keskenään.

3.5. Yhteenveto

Nykyiset kaupalliset lennokit käyttävät paikannukseen pääasiassa satelliittipaikannusta, josta GPS- ja GLONASS-palvelut ovat nykyisissä lennokeissa käytössä, sekä inertiaipaikannusta. Satelliittipaikannuksen ollessa siviilitarkoituksiin riittävän luotettava, ei valmistajilla todennäköisesti ole halua kehittää kuluttajille tarkoitettuihin lennokkeihin muita paikannusmenetelmiä. Kuitenkin sotilaskäytössä satelliittipaikannukseen ei ole aina mahdollista luottaa, sillä sitä voidaan esimerkiksi häiritä. Sotilaskäyttöön tehty Shield AI Nova -lennokki kuitenkin kykenee toimimaan ainakin sisätiloissa ilman satelliittipaikannusta hyödyntäen muita paikannusjärjestelmiä.

Toisaalta tässä luvussa käsitelty kuvantunnistus ja radiosignaaleihin perustuva paikannus eivät ole vielä sellaisessa vaiheessa, että niitä voisi luotettavasti käyttää kuluttajatuotteissa. Kvantunnistukseen perustuva paikannus voisi teknisesti olla nykyisissä lennokeissa mahdollista, sillä käytännössä kuvantunnistus vaatisi yksinkertaisimmillaan lennokilta kameran, joka lennokeissa käytännössä on aina, kartan ympäristöstä ja laskentatehoa paikanmäärittämiseen, jotka ovat sijoitettavissa lennokkiin mahdollisesti pienin muutoksin. Toisaalta kuvantunnistuksen vaatima kuvadata vaatii tiedon lennokin lentoalueesta ennen tehtävää, jotta oikean alueen kuvadata saadaan sijoitettua lennokkiin, sillä esimerkiksi koko Suomen kattava riittävän tarkka kuvadata todennäköisesti vaatisi aivan liikaa tallennustilaa lennokeista.

Radiosignaaleihin perustuva paikannus taas vaatisi joko kartan soveltuvista signaalilähteistä tai lennokeille kyvyn paikantaa signaalilähteet yhdessä oman paikanmäärittäytymisen kanssa. Jälkimmäinen toiminta vaatisi joko satelliittipaikannuksen tarkemman kartan rakentamiseksi, sillä paikannustarkkuus inertiaipaikannusjärjestelmillä ja radiosignaaleilla ei ole todennäköisesti riittävä tarkan kartan luomiseksi lennokkien toiminta-alueelta. Ylimääräisiä radiosignaaleja ei myöskään välttämättä ole käytettävissä lennokkiparven suunnitellulla tehtäväalueella

kriisitilanteissa. Lisäksi radiosignaaleihin perustuva paikannus vaatii käytettävän signaalin taajuusalueelle sopivan antennin, joka taas lisää lennokille tulevaa kuormaa.

Radiosignaaleihin liittyen, vastaanotettujen signaalien aikaeroon perustuva paikannus (*time difference of arrival, TDOA*), joka vaatii kaksi tai useampaa vastaanotinta ja vastaanotetun signaalin tietojen vaihtamista vastaanotinten kesken, voisi hyvinkin olla käyttökelpoinen parveilevissa lennokeissa. Parveilevat lennokit todennäköisesti liikkuvat samalla alueella, vastaanottavat samat signaalit ja ovat muutenkin yhteydessä toisiinsa viestiyhteydellä. Paikannus signaalien aikaeroilla vaatisi lennokkeihin vain sopivat antennit ja vastaanottimet halutun taajuusalueen vastaanottoon.

Paikannusjärjestelmä	Kyvvyt	Haitat
Satelliittipaikannus	Tarkka, yksinkertainen ja halpa toteuttaa, monia konstellatioita käytettävissä	Riippuvuus yhteydestä satelliitteihin, häiritävissä
Inertiapaikannus	Lennokin sijainnin seuraaminen ilman ulkoisia lähteitä	Tarkkuus huononee ajan myötä, vaatii muiden paikannusjärjestelmien tukea
Kuvantunnistus	Toiminta sisätiloissa, mahdollisuus samalla kartottaa ympäristö	Tekniikasta riippuen tarvitsee valmista kuvadataa, olosuhteiden sieto riippuu käytettävistä sensoreista
Radiosignaalit (<i>AoA, ToA, TDoA, RSS</i>)	Käytettävyys varsinkin asutuskeskuksissa, TDoA mahdollinen soveltuvuus lennokkiparviin	Huono tarkkuus, tekniikan epäluotettavuus, mahdolliset ylimääräiset antennit

Taulukko 6. Koonnos paikannusjärjestelmistä

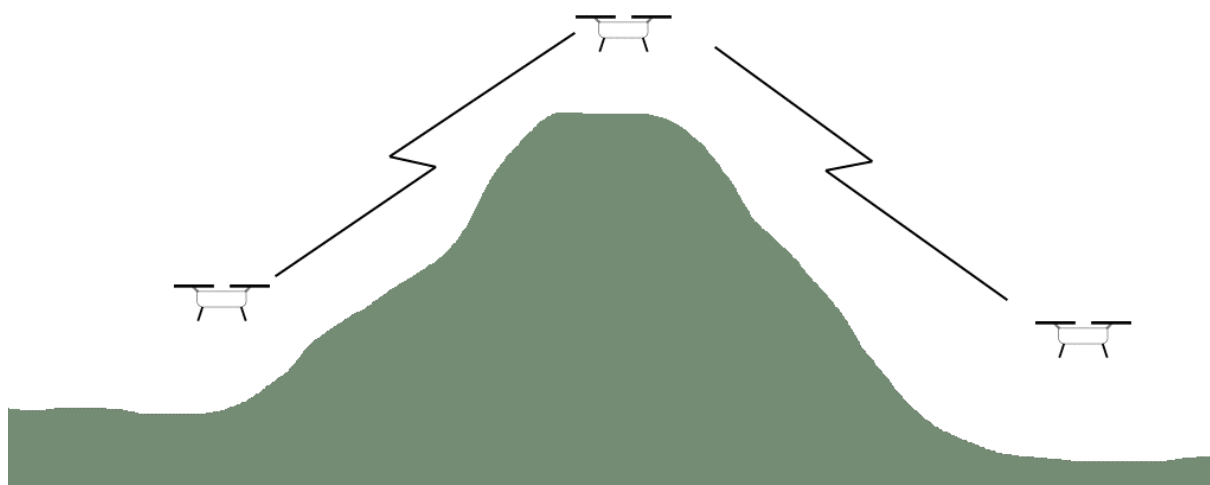
4. LENNOKKIPARVEN KOMMUNIKAATIO

Tässä luvussa vastataan alatutkimuskysymykseen ”Miten yksittäiset ja parveilevat lennokit kommunikoivat?”. Lennokkiparvien voidaan ajatella karkeasti tarvitsevan kahden tyyppistä kommunikaatiota. Jotta usea lennokka kykenisi toimimaan yhdessä parvena, täytyy niiden kommunikoida keskenään. Tämän lisäksi pelkät ilmassa olevat lennokkiparvet eivät tuota juurikaan lisäarvoa, ellei niitä ole mahdollista ohjata ihmisen toimesta, tai parven lennokeilta ei saada esimerkiksi haluttua tiedustelutietoa. Tarvitaan siis lennokkiparven sisäistä kommunikointia sekä kommunikointia parven ulkopuolelle.

4.1. Lennokkien rakenteen vaikutus kommunikaatiolle

Lennokkien muodostamat tietoverkot aiheuttavat useita haasteita ja toisaalta mahdollisuuksia käytettävälle tiedonsiirtotekniikoille. Lennokkien tyyppi ja koko voivat vaikuttaa käytettävän tiedonsiirtomenetelmän valintaan. Lennokkien lentäessä ilmassa muodostuvat niiden verkot kolmiulotteisiksi, kun lähtökohtaisesti tavanomaiset tiedonsiirtoverkot ovat kaksiulotteisia. Lennokeilla on myös kyky ja myös tehtävästä riippuen tarve liikkua, mikä vaatii verkolta kyvyn mukautua lennokkien liikkeisiin. Lisäksi lennokeilla on rajallinen kuormankantokyky sekä lentoaika. [65 s. 46-47]

Lennokit toimivat kolmiulotteisessa ympäristössä, jolloin myös niiden muodostamat verkot ovat kolmiulotteisia. Tämä mahdollistaa lennokkien kyvyn väistää toisiaan ja esteitä. Käytännössä tämä pakottaa lennokit käyttämään ympärisäteileviä antennejä, sillä suuntaavien antennien käyttäminen muuttuvassa kolmiulotteisessa ympäristössä on vaikeaa. Lennokkien kyky liikkua nopeasti on myös sekä etu, että haitta. Lennokkien liikkuesssa nopeasti, voi tiedonsiirtoverkko katketa tai jakautua useaksi toisistaan erilliseksi verkoksi. Toisaalta lennokkien liikkeellä voidaan mahdollistaa tiedonsiirtoverkon muuttaminen tilanteen vaatimalla tavalla, siten että kaikkien lennokkien välillä säilyy tiedonsiirtoyhteys. Tämä yhdistettynä lennokkien kolmiulotteiseen ympäristöön mahdollistaa tiedonsiirtoverkon kiertämisen suurten esteiden yli muuttamalla lennokkien sijainteja. [65 s. 47-49] Käytännössä kopterityyppisten lennokkien on mahdollista pysähtyä, jolloin verkon ei pitäisi muuttua, mutta kiinteäsiipisten lennokkien on ilmassa pysyäkseen liikuttava koko ajan, mikä mahdollisesti aiheuttaa jatkuvaa muutosta verkon rakenteessa.



Kuva 13. Liikkuvuuden ja kolmiulotteisuuden hyödyntäminen lennokkien tietoverkoissa

Lennokkien tyyppi ja koko vaikuttavat lennokkien kuormankantokykyyn, joka taas rajoittaa lennokkien käyttämiä tiedonsiirtomenetelmiä. Iso, raskas ja pitkän toiminta-ajan omaava lennokka pystyy todennäköisesti kuljettamaan kooltaan ja tehokulutukseltaan suurempaa radiota, kun taas pienet lennokit voivat joutua käyttämään pienempikokoisia ja -tehoisia radioita, jolloin yhteydet muihin lennokkeihin voivat kulkea usean lennokin kautta. Tehokkaampi radio voi mahdollistaa suuren tiedonsiirtokapasiteetin yhden yhteyden kautta, kun taas pienempi tehoisten radioiden tiedonsiirtokapasiteetti jää pienemmäksi ja yhteydet lyhyemmiksi. Myös antennien koko on riippuvainen lennokin kantokyvystä. Lennokkien rajallinen kuormankantokyky voi rajata pois suuret useasta antennielementistä koostuvat antennit. Lennokkien suuri kuorma on myös kääntäen verrannollinen lennokin lentoaikaan, jolloin suurempi kuorma laskee lennokin lentoaikaa. [65 s. 47-49] Esimerkiksi luvussa 2 esitelty DJI Phantom 4 Pro ja Mavic 2 -lennokit sekä Skydio 2 toimivat 2,4 GHz ja 5,8 GHz taajuusalueilla [19; 20; 77]. 2,4 GHz taajuusalueelle sopivan ideaalin puolialtrodipolin koko on noin 6 cm [65 s. 38]. Antenni voidaan luonnollisesti rakentaa lennokin tyypillisesti muovista rakennetun rungon sisään, tai se voi esimerkiksi Shield AI Nova-lennokin tapauksessa olla myös lennokin rungon ulkopuolella. Nova-lennokin ratkaisulla mahdollisesti halutaan parantaa antennin toimintaa sijoittamalla se vapaaseen tilaan, jolloin sen ympärillä ei ole esimerkiksi häiritsevää elektroniikkaa. Toisaalta voidaan ajatella myös rungon ulkopuolisen antennin vaikuttavan lennokin ilmanvastukseen, jolloin antenni voi myös ilmanvastuksen vaikutuksesta laskea lennokin lentoaikaa edelleen.

4.2. Lennokkien siirtämä tieto

Lennokkien siirtämä tieto voidaan luokitella kolmeen tyyppiin, telemetria-, koordinointi- ja sensoritietoon. Telemetriatieto on tietoa lennokin tilasta ja sijainnista. Tämän tiedon avulla yksittäisen lennokin kanssa ohjaaja tietää muun muassa lennokin sijainnin ja akun tason. Parveilevien lennokkien tapauksessa tämä tieto pitäisi välittää parven muille lennokeille. Koordinoititieto on tietoa, jolla lennokit koordinoivat omaa toimintaansa, kuten reittisuunnitelmia ja reititystietoja. Koordinoititieto on tarpeellista vain lennokeille, jotka toimivat yhdessä ja suunnittelevat ja toteuttavat tehtävänsä autonomisesti. Sensoritieto on taas lennokkien sensorien tuottamaa tietoa lennokkien ohjaajalle. [65 s. 49-51]

Lennokkien välittämän tiedon tarve riippuu lennokkien autonomian tasosta. Lennokkien tehdessä päätöksiä itsenäisesti ilman yhteistä konsensusta, ei niiden tarvitse välittää niin paljoa koordinoititietoa kuin jos lennokit tekisivät päätöksen yhdessä. [65 s. 49] Esimerkiksi ACL-tasolla 0, jolloin järjestelmä on kauko-ohjattu ilman autonomiaa, lennokkien tarvitsee välittää ohjaajalle vain telemetriatieto sekä sensorin tuottama tieto, kun taas esimerkiksi tasolla 7, jolloin lennokit toimivat hierarkkisessa yhteistoiminnassa, lennokkien todennäköisesti täytyy lähettää myös koordinaatitietoa. Myös tasolla 5 oleva kyky täydentää omaa ympäristötietoisuutta muiden lennokkien tiedolla vaatii esimerkiksi sensoritiedon tai vähintään sensoritiedosta analysoidun tiedon välittämisen lennokkien kesken. [12]

Siirrettävällä tiedolla voi olla myös erilaiset vaatimukset tiedonsiirtokapasiteetin suhteen. Esimerkiksi videokuva vaatii kuvanlaadusta riippuen huomattavasti enemmän tiedonsiirto-kaistaa, kun taas telemetria- ja koordinoititieto siirtyy huomattavasti alhaisemmalla kaistavaatimuksella. Esimerkiksi koordinointi ja telemetriatieto voi vaatia 5-250 kbit/s tiedonsiirtokapasiteetin riippuen lennokkien määrästä ja koordinoititiedon lähetystiheydestä. [65 s. 53] Videokuva tarkkuudesta riippuen (720p - 1080p) vaatii pakkaamattomana 1,3-3 Gbit/s tiedonsiirtokapasiteetin, mutta hyvin pakattuna 20 Mbit/s riittää videokuvan tiedonsiirtokapasiteetiksi [3 s. 6]. Toisaalta videokuva voidaan pakata vielä pienemmäksi, jolloin kapasiteetiksi voi riittää jopa 2 Mbit/s [65 s. 53]. Toisaalta kuvan pakkaaminen laskee kuvan laatua sekä vaatii laskentatehoa, kuluttaen samalla lennokin akkua. Lennokkien käyttöperiaatteen mukaan tiedon tarve voi olla reaaliaikaista, kuten lennokkiparvien yhteydessä oleva koordinoititieto [65 s. 53]. Toisaalta kaikkea tietoa ei välttämättä tarvitse välittää lennon aikana heti, kuten esimerkiksi alueen kartoituksen tuottama lopputulos [65 s. 53].

4.3. Lennokkien tietoverkot

Lennokkien käyttämät tietoverkot voidaan jakaa joko tukiasemaverkkoihin (*infrastructure*) tai ilman tukiasemia toimiviin *ad hoc* -verkkoihin. Tukiasemaverkko vaatii verkossa olevan keskitetyn tukiaseman, johon muut verkon laitteet yhdistyvät. Ad hoc -verkossa sen sijaan ei ole keskitettyä tukiasemaa, vaan verkon laitteet ovat suoraan yhteydessä toisiinsa. Tukiasemaan perustuva verkkorakenne voi olla perusteltua, jos lennokkeja ohjataan keskitetysti. Tällainen voi olla esimerkiksi hierarkkisesti johdettu lennokkiparvi, jossa parvea johtava lennokki on tukiasema muille parven lennokeille. Toisaalta jos parven halutaan toimivan ilman keskitettyä ohjausta, on sille sopivampi vaihtoehto tällöin ad hoc -verkko. [65 s. 52-54]

Tukiasemana voi toimia kauko-ohjattavien lennokkien tapauksessa esimerkiksi itse kauko-ohjain tai lennokki. Esimerkiksi DJI Mavic 2 -lennokki mahdollistaa saman lennokin ohjaamisen kahdella ohjaimella, jotka yhdistetään lennokkiin [19 s. 46-47]. Lennokki mahdollistaa tällöin sen ohjaamisen käyttäen kahta ohjainta, mutta priorisoi ensimmäisen ohjaimen komennot [19 s. 46-47]. Voidaan siis ajatella, että kyseisessä tapauksessa lennokissa on tukiasema, johon on mahdollista yhdistää useampi kauko-ohjain.

Lennokkien tietoverkot voivat muodostua myös tukiasema- ja ad hoc -verkkojen yhdistelmiksi. Tällöin esimerkiksi yhdellä lennokilla on yhteys tukiasemaan ja muut ovat yhteydessä tähän yhteen lennokkiin ad hoc -verkkona. Verkot voivat myös jakautua useammaksi erilliseksi verkoksi, jotka ovat tai eivät ole yhteydessä toisiinsa. Tällainen voi tapahtua tahattomasti tai suunnitellusti, jos jokin parven osa halutaan esimerkiksi irrottaa erilliseen tehtävään eikä näiden kahden osan välillä säily jakautumisen aikana yhteys.

Liikkuvista laitteista koostuvaa ad hoc -verkkoa kutsutaan termillä MANET, *Mobile Ad hoc Network*. MANET-verkko koostuu solmuista, jotka toimivat sekä päätelaitteina, että reitittiminä, jotka välittävät tietoa eteen muille verkossa oleville solmuille. MANET-verkoissa ei tarvitse olla keskitettyä hallintaa, vaan verkko rakentuu ja reitittyy automaattisesti. [65] Yksi MANET-verkkojen tyyppi on langaton mesh-verkko (*WMN, wireless mesh network*), jossa kaikki verkon solmut ovat yhteydessä toisiinsa. MANET- ja mesh-verkkojen etuna on niiden kyky sopeutua verkon muutoksiin. [16] Tämä mahdollistaa verkon korjaantumisen automaattisesti, jos lennokkeja häviää verkosta tai niitä tulee verkkoon lisää.

Wi-Fi-verkkoja (IEEE 802.11 -standardi) hyödynnetään tiedonsiirtoyhteytenä pienissä halvoissa lennokeissa [65 s. 52]. Esimerkiksi Skydio 2 -lennokkia on mahdollista ohjata Wi-Fi-yhteyden kautta. Wi-Fi-yhteyden lisäksi lennokissa on käytettävissä valmistajan oma Skydio Link -tiedonsiirtoyhteys, joka toimii kuitenkin samalla taajuualueella kuin 802.11

Wi-Fi (2,4 GHz ja 5 GHz). [77] DJI:n Phantom 4 Pro ja Mavic 2 -lennokeissa ei ole Wi-Fi ohjausyhteyttä, mutta niissä on kuitenkin samoilla taajuualueilla oleva OcuSync 2.0 -tiedonsiirtoyhteys [19; 20]. Wi-Fi-verkkoja voidaan myös luoda joko tukiasemaverkkoina tai ad hoc -verkkoina [65 s. 52].

IEEE 802.11 Wi-Fi -verkkojen pääkäyttötarkoituksena on luoda langattomia lähiverkkoja sisätiloihin, jolloin kyseisillä verkoilla yhteysetäisyydet on myös suunniteltu lyhyiksi. Tyypillisissä käyttöolosuhteissa 802.11-tekniikoilla on mahdollista saada esimerkiksi älypuhelimeen 433 Mbit/s nopeudella toimiva yhteys, vielä suurempien nopeuksien ollessa mahdollisia useaa antennia hyödyntävillä ratkaisuilla. 802.11 Wi-Fi -verkot käyttävät OFDM-modulaatiota (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), jossa lähetettävä signaali jaetaan useaan samanaikaisesti lähetettävään alikantotaaloon. Käytännössä 802.11 Wi-Fi -verkkojen suuri tiedonsiirtonopeus saadaan kasvattamalla lähetettävän signaalin kaistanleveyttä, jolloin myös OFDM-modulaation alikantotaaltojen määrä kasvaa. Esimerkiksi 20 MHz kaistanleveydellä signaalilla 802.11n-standardissa käytetään 56 alikantotaaltoa ja 802.11ac-standardissa 80 MHz kaistanleveydellä 242 alikantotaaltoa. Tämä tarkoittaa myös käytettävän lähetystehon jakautumista suuremmalle taajuualueelle. [3]

Yhteysetäisyyden kasvaessa satoihin metreihin, yhteyden nopeus laskee huomattavasti. Esimerkiksi 600 metrin yhteysetäisyydellä käyttäen 802.11n-standardin yhteyttä yhteyden nopeus voi olla vain 1 Mbit/s. Toisaalta käyttämällä tiedonsiirtoon kolmea antennia yhden antennin sijaan, on 500 metrin yhteysetäisyydellä mahdollista päästä jopa 10 Mbit/s nopeuteen ja 100 metrin yhteysetäisyydellä jopa 100 Mbit/s nopeuteen. Myös vanhemmalla 802.11b-standardilla yhteysnopeus kahden kilometrin yhteysetäisyydellä voi olla jopa 1,4 Mbit/s. Hyödyntämällä ad hoc -verkot mahdollistavaa 802.11s-standardia, on yhteys mahdollista luoda useamman lennokin kautta, jolloin 600 metrin yhteysetäisyydellä käyttämällä kolmatta lennokkien välissä olevaa lennokkia tiedonsiirtonopeus voi olla 2 Mbit/s aikaisemman suoran yhteyden 1 Mbit/s nopeuden sijaan. [65 s. 54-57] Lennokkien väliset etäisyydet riippuvat luonnollisesti lennokkiparven tehtävästä ja toiminta-alueesta. Perdix-lennokkien etäisyydet lähimmistä naapureista järjestelmän esittelyvideon perusteella ovat arviolta suurimmillaan muutamia satoja metrejä [70]. Tällaisessa tilanteessa voidaan olettaa 802.11 Wi-Fi-verkkojen kykenevän riittävien lennokkien välisten yhteyksien muodostamiseen.

Traficomien mukaan 2,4 GHz alueella toimivien langattomien verkkojen ja samalla taajuualueella toimivien lennokkien suurin sallittu lähetysteho on 100 mW ja 5 GHz taajuualueella parhaimmillaan 1 W, kuitenkin siten että lähetteen tehotiheys on enintään 50 mW / 1 MHz [54 s. 10]. Karkeasti, jaettaessa 2,4 GHz taajuualueelle tarkoitettu 100 mW teho 20 MHz

kaistalle saadaan tehotiheydeksi 5 mW / 1 MHz. Levittämällä kaistanleveys esimerkiksi 40 MHz kaistalle laskee tehotiheys tästä puoleen. Tämä lyhentää yhteysetäisyyttä lähetystehon jakautuessa laajemmalle alueelle ja siten ollen herkempi häviöille. Skydio 2 -lennokissa oleva valmistajan oma Skydio Link käyttää 802.11-standardia kapeampia kaistanleveyksiä 5 ja 10 MHz [77]. Skydio 2 kykenee valmistajan mukaan hyvissä olosuhteissa 3,5 kilometrin yhteysetäisyyteen kauko-ohjaimen ja lennokin välillä [77]. Kapeampi kaistanleveys voi selittää Skydio 2 -lennokin Wi-Fi-yhteyttä suuremman kantaman, lähetystehon tehotiheyden säilyessä suurempana. Kapeampi kaistanleveys mahdollistaa myös muiden läheteiden väistämisen helpommin samalla kaikkien muiden lennokkien käyttämän taajuusalueen sisällä, kapeamman kaistanleveyisen signaalin erottuessa alueelta helpommin. Käytännössä esimerkiksi 80 MHz kaistanleveyinen 802.11n-signaali käyttää lähes koko 2,4 GHz sallitun taajuusalueen, eikä alueelle siis mahdu enää toista saman levyistä signaalia.

Lennokkien välinen todellinen yhteysnopeus riippuu kuitenkin hyvin monesta asiasta, kuten ympäristön vaimentavista tekijöistä, antennirakenteista ja lähetystehoista, jolloin edellä mainitut nopeudet ovat suuntaa antavia. Lisäksi Wi-Fi-tekniikka on kehitetty siviilitarkoituksiin, eikä sen toimivuuteen sotilaallisessa ympäristössä esimerkiksi häirinnän alla voi luottaa.

4.4. Reititys MANET-verkoissa

Koska kaikki MANET-verkkoon kuuluvat laitteet toimivat myös liikennettä välittävinä reitittiminä, muodostuu tiedon välitys MANET-verkossa haasteeksi. Tieto voidaan MANET-verkossa välittää käyttäen joko tulvahakua (*flooding*) tai reititystä (*routing*). Tulvahaku perustuu siihen, että verkon solmu lähettää muille solmuille tarkoitetun tiedon kaikille naapurisolmuilleen. Tällöin lähetetty tieto löytää itsensä oikealle vastaanottajalle ilman, että lähettäjä tietää missä vastaanottaja sijaitsee verkossa. Tulvahaku on tekniikkana yksinkertainen ja toimintavarma, sillä lähetetty tieto mahdollisesti kulkee useaa reittiä pitkin vastaanottajalle. Tämä ei vaadi reititystaulun ylläpitämistä tai laskentatehon käyttämistä reitin suunnitteluun. Toisaalta verkon solmut lähettävä hyvin paljon tietoa muille, jota ei välttämättä tarvitsisi lähettää, kuluttaen tällöin enemmän energiaa lähettämiseen ja vastaanottamiseen. [16]

Tulvahaun sijasta verkoissa voidaan käyttää reititystä, johon on käytettävissä useita erilaisia protokollia. Reitityksessä solmut eivät lähetä tietoa kaikille solmuille vaan ainoastaan laskeutulla reitillä oleville solmuille. Tämä on tehokkaampaa, sillä vain tarvittavat solmut ovat aktiivisia. Toisaalta reitityksen onnistumista varten solmujen täytyy verkossa välittää myös reititystietoja, tuottaen ylimääräistä kuormaa verkolle. Erityisesti suurissa reititykseen perustuvissa verkoissa reititystaulu kasvaa ja monimutkaistuu, laskien tiedonsiirron luotettavuutta verrattuna tulvahakuun perustuvaan verkkoon. [16]

802.11 Wi-Fi -verkkojen ja ylipäänsä koko internetin kanssa käytetty yleinen TCP/IP-protokollaperhe (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) on alun perin suunniteltu kiinteisiin verkkoihin, eikä siten täysin sovellu hyvin langattomiin verkkoihin. TCP/IP-protokollaperheen yleisimmät tiedonsiirtoon käytettävät protokollat ovat TCP ja UDP (*User Datagram Protocol*). Näistä TCP pyrkii varmistamaan lähetyn tiedon perillemenon, kun UDP ei varmista tiedon perillemenoä. TCP:n soveltumattomuutta langattomiin verkkoihin korostaa sen tapa hallinnoida tiedonsiirrossa kadonneita tiedonsiirtopaketteja. TCP olettaa pakettien katoamisen johtuvan verkon ruuhkautumisesta, ja laskee seuraavien pakettien lähetyksnopeutta. Langattomissa verkoissa pakettien katoaminen johtuu yleisemmin epäluotettavasta tiedonsiirtoyhteydestä kuin ruuhkautumisesta. UDP ei myöskään ole kovin käyttökelpoinen, sillä siitä puuttuu tiedon perillemenon varmistus ja soveltuu silloin vain sellaisen tiedon lähettämiseen, jonka perille meno ei ole välttämätöntä. TCP/IP-protokollaperheen protokollat lisäävät lähetettyyn tietoon paljon ohjaustietoa, mikä kasvattaa etenkin pienten tietopakettien, kuten koordinointi- ja telemetriatiedon, lähetettävää kokoa. [65 s. 61-63]

MANET-verkkoja varten on olemassa myös juuri sitä varten kehitettyjä protokollia, kuten AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*), DSR (*Dynamic Source Routing*), DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector*) ja OLSR (*Optimised Link State Routing*). Näillä kaikilla on kuitenkin ongelmana jo mainittu reititystaulun kasvaminen suureksi suurilla verkoilla. Myöskään reititystaulun päivittyminen näillä verkoilla ei ole riittävän nopea, jotta se pysyisi mukana ilmassa nopeasti liikkuvien lennokkien aiheuttamista verkon muutoksista. On myös kehitetty reititysprotokollia, jotka perustavat reitityksensä solmujen GPS-koordinaatteihin, kuten LAR (*Location Aided Routing*). Liikkuvien lennokkien tarpeisiin on myös kehitetty täysin omia reititysprotokollia kuten AeroRP (*Aeronautical Routing Protocol*), joka pyrkii olemaan yhteensopiva TCP:n kanssa, keventämään TCP-protokollaa sekä ottamaan huomioon lennokkien liikkeen reitityksessä. [65 s. 66]

4.5. Kommunikaatio parven ulkopuolelle

Johtuen aikaisemmin mainituista rajoituksista pienikokoisten lennokkien rakenteessa, merkittävimpinä paino ja akkukapasiteetti, ei ole ideaalia rakentaa lennokkeihin toista kommunikointijärjestelmää pelkästään ulkoista ohjausyhteyttä varten. Käytännössä siis kommunikaatio parven ulkopuolelle ideaalisti tapahtuisi samoilla radioilla kuin parven sisäinen kommunikaatio. Tällöin näitä radioyhteyksiä koskee myös samat aiemmin mainitut rajoitteet. Radioyhteys kuitenkin saattaa jäädä lyhyemmäksi kuin lennokkien välinen yhteys, johtuen esimerkiksi maaston ja rakennusten aiheuttamista vaimennuksista, kun taas ilmassa olevat lennokit pystyvät toimimaan pääosin ”vapaassa tilassa”, jolloin ympäristön aiheuttamat vaimennukset jäävät

pienemmiksi. Ulkoista yhteyttä ylläpitävän maa-aseman ollessa liikkumaton, antennit on luonnollisesti mahdollista nostaa esimerkiksi puuston yläpuolelle, jolloin yhteyttä voidaan parantaa. Maa-aseman ollessa liikkuva, esimerkiksi taisteluajoneuvo, rajoittuu antennien asettelu ajoneuvoon.

Lennokkiparvilla on kuitenkin mahdollista kasvattaa maayhteyden yhteysetäisyyttä muodostamalla lennokeista esimerkiksi verkkoa jatkava solmuja, jotka välittävät viestejä eteenpäin [18]. Yksinkertaisimmillaan tämä onnistuu muodostamalla lennokeista jono, johon lisätään lennokkeja automaattisesti yhteyden laadun laskiessa liikaa [76]. Toisaalta jos parvi omaa riittävän autonomian tason sille annetun tehtävän autonomiseen suorittamiseen, ei lennokkiparvi välttämättä tarvitse jatkuvaa yhteyttä maa-asemaan. Tällöin riittää, että parvi saa tehtävän ohjaajalta, suorittaa tehtävän ilman ohjaajan ohjausta, palaa takaisin ja raportoi tehtävän suorituksen ohjaajalle. Toisaalta jos parven johtamista ei ole hajautettu ja se tapahtuu esimerkiksi keskitetysti maa-asemalta, tarvitsee lennokkiparvi jatkuvan maayhteyden.

Toisaalta maayhteysasemalla voidaan hyödyntää raskaampia ja tehokkaampia antenniratkaisuja. Esimerkiksi hyödyntämällä 100 antennielementistä koostuvaa massiivista MIMO (*multiple input and multiple output*) -järjestelmää voidaan yhteysetäisyyttä laskennallisesti kasvattaa kymmenkertaiseksi käyttäen kuitenkin samaa lähetystehoa kuin yksittäisellä antennilla [7]. Optimaalinen antennielementtien välinen etäisyys tämän kaltaisessa järjestelmässä on puolen aallonpituuden mittainen, eli 2,4 GHz taajuusalueella 6,25 cm [7]. Sadan antennielementin ollessa 10 x 10 neliössä muodostuu koko antennin pohjan sivun pituudeksi noin 56 cm. Tämän kokoinen antennirakenne on todennäköisesti liian suuri pieneen lennokkiin, mutta voisi olla käyttökelpoinen maayhteysasemalla. Suurella antennielementtien määrällä voidaan ainakin teoriassa parantaa kantaman lisäksi myös järjestelmän tiedonsiirtokapasiteettia [7].

Lennokkiparviin ulkoisiin yhteyksiin voidaan käyttää myös muuta yhteyttä kuin parven lennokkien välisiin yhteyksiin käytettyä yhteyttä. Yksi vaihtoehto ulkoiselle ohjausyhteydelle on matkapuhelinverkot, jolloin esimerkiksi yksi lennokki pitää yllä yhteyttä matkapuhelinverkon tukiasemaan, ollen samalla yhteydessä muihin lennokkeihin sisäisellä yhteydellä [18]. Todennäköisesti parvi olisi tällöin yhteydessä lennokkiparven ohjaajaan internetin kautta. Toisaalta Suomessa Traficom kieltää luvasta vapaiden radiolähettimien määräyksessä 15AO/2019 matkapuhelinverkon päätelaitteen käyttämisen lennokissa tai miehittämättömässä ilma-aluksessa [54 s. 5]. Tämä tuskin olisi suuri rajoite, sillä kyseisessä määräyksessä on tällä hetkellä 30.9.2020 asti voimassa oleva poikkeus, joka mahdollistaa matkapuhelinverkkojen päätelaitteen asentamisen lennokkiin eri viranomaisten tiettyihin tehtäviin liittyen [54 s. 5]. Toisaalta

matkapuhelinverkkojen toimintaan ei voi täysin luottaa sotilaskäytössä mahdollisen kriisin aikana.

Yksi vaihtoehto yhteydeksi lennokkeihin on myös satelliittitiedonsiirto. Esimerkiksi koko maapallon kattavia satelliittiviestintäpalveluja tarjoava Iridium valmistaa myös pienikokoisiin lennokkeihin soveltuvia satelliittilähetin-vastaanottimia [42]. Iridium Core 9523 satelliittilähetin-vastaanotin on kooltaan noin 70 mm x 36 mm x 9 mm ja painaa 32 grammaa [41]. Tällainen voisi mittojen perusteella hyvinkin olla sijoitettavissa pieneen lennokkiin. Toisaalta edellä mainitut mitat eivät pidä sisällään satelliittiradion vaatimia antennia.

Edellä mainitun Iridium Core 9523 -satelliittiradion suurin lähetysteho on noin 1 W ja radio pelkästään päällä ollessaan kuluttaa tehoa noin 0,25 W [41]. Lähetystehon osalta kyseinen radio on siis saman tehoinen kuin esimerkiksi 5 GHz Wi-Fi radiot. Toisaalta radion muodostaessa yhteyksiä usean sadan kilometrin päähän avaruuteen, muodostetun yhteyden pituus on huomattavasti suurempi kuin Wi-Fi-yhteyksillä. Tiedonsiirtonopeus ja vasteaika pienten satelliittiradioiden kanssa jää kuitenkin hyvin pieneksi. Edellä mainittu Iridium Core 9523 -radio kykenee valmistajan mukaan lähettämään tai vastaanottamaan yhden kilotavun kokoisen viestin alle 45 sekunnissa [42]. Tällainen tiedonsiirtokapasiteetti ei riitä esimerkiksi reaaliaikaisen videokuvan välittämiseen. Satelliiteilla on mahdollista saavuttaa suurempiakin tiedonsiirtonopeuksia, kuten Hughes JUPITER-satelliittitiedonsiirtojärjestelmällä, jonka maksimi tiedonsiirtonopeus on 300 Mbit/s [36]. Kyseisen järjestelmän päätelaitteet ovat kuitenkin kookkaita ja kuluttavat paljon tehoa tiedonsiirtoon [37]. Näin ollen suuren tiedonsiirtokapasiteetin omaavat satelliittilähetinvastaanottimet eivät sovellu pieniin lennokkeihin, vaan niiden käyttö rajoittuu huomattavasti kookkaampiin lennokkeihin.

4.6. Elektronisen häirinnän vaikutukset

Sotilaskäytössä lennokkiparvien kommunikaation mahdollinen uhka on elektroninen sodankäynti ja tarkemmin parven kommunikaatiota vaikeuttava elektroninen häirintä. Sampo Nurmio simuloi omassa pro gradu -tutkielmassaan 2,4 GHz alueella toimivan lennokin häiritävyyttä signaalin peittävällä häirinnällä [66]. Kyseisen simulaation perusteella 2,4 GHz alueella toimivan lennokin ohjausyhteyden häirintä on mahdollista lyhyellä etäisyydellä ympäristäilevällä antennilla [66]. Häirintäetäisyyttä on kuitenkin mahdollista kasvattaa käyttämällä suuntaavaa antennia, mutta tällöin vaaditaan havainto häiritävästä kohteesta [66].

Toisaalta 802.11 Wi-Fi-järjestelmiä vastaan häirinnän ei kuitenkaan tarvitse peittää koko signaalia. Yhteyden häiritsemisellä voidaan saada aikaan yhteyden tiedonsiirtokapasiteetin lasku, vaikka häirintä ei peittäisikään koko signaalia [1]. Varsinkin Wi-Fin suuremman tiedonsiirto-

kapasiteetin omaavat signaalit ovat alttiita häirinnälle ja matalamman tiedonsiirtokapasiteetin omaavat signaalit puolestaan toimivat luotettavimmin [5]. Wi-Fin yhteydessä käytettävän signaalin valinta tapahtuu automaattisesti, jolloin häirityllä yhteydellä verkon laitteet automaattisesti sopivat matalamman tiedonsiirtokapasiteetin modulaation käytöstä [3].

Toisaalta Wi-Fiä ja muitakin digitaalisia modulaatioita voidaan häiritä myös älykkäästi hyväksikäyttämällä modulaatioiden ominaisuuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi Wi-Fin käyttämän OFDM-modulaation tahdistussignaalit, joiden oikea-aikaisella häirinnällä pystytään vaikeuttamaan OFDM-modulaation toimintaa [1]. Myös matkapuhelinverkkoja voidaan häiritä hyödyntämällä niiden käyttämien signaalien ominaisuuksia. 3G UMTS -verkkojen häirintä on mahdollista toteuttaa toistamalla 10 ms pituista signaalia, jolloin verkon laitteiden tahdistussignaalit menevät sekaisin [85]. Myös satelliittitiedonsiirron voidaan olettaa olevan altis häirinnälle johtuen pienistä lähetystehoista ja satojen kilometrien yhteysetäisyydestä. Tällöin vastaanotettava signaali on joka tapauksessa hyvin heikko ja siten peitettävissä häirinnällä.

4.7. Yhteenveto

Lennokkien tiedonsiirtoon käytetään nykyisissä kaupallisissa lennokeissa joko 802.11 Wi-Fi -verkkoja tai eri valmistajien kehittämiä omia tiedonsiirtojärjestelmiä. Valmistajien omat tiedonsiirtojärjestelmät kuitenkin toimivat samoilla taajuualueilla kuin 802.11 Wi-Fi -verkot. Wi-Fi-verkkojen etuna voidaan pitää niiden kykyä suureen tiedonsiirtoon ja alkuperäistä käyttötarkoitusta tiedonsiirtoverkkojen muodostamiseen. Valmistajien omat tiedonsiirtotekniikat puolestaan mahdollistavat Wi-Fi-verkkoja suuremman kantaman samalla lähetysteholla, mutta niiden kyvystä toteuttaa usean lennokin verkkoa ei ole tietoa. Wi-Fi-verkkojen käytettävyydelle tuo haasteita niissä tavanomaisesti käytetyn TCP/IP-protokollaperheen soveltumattomuus epäluotettavaan langattomaan tiedonsiirtoon. Suurissa verkoissa haasteeksi muodostuu tiedon reitittäminen muuttuvassa verkossa.

Ulkoiseen kommunikaatioon on mahdollista hyödyntää samoja tiedonsiirtotekniikoita kuin sisäiseenkin tiedonsiirtoon, jolloin lennokit eivät tarvitse yhteyttä varten muita radioita tai antennejä. Lennokkeja on kuitenkin mahdollista ohjata myös matkapuhelinverkkojen kautta tai käyttäen satelliittitiedonsiirtoa. Näiden käyttö kuitenkin kriisiaikana voi olla vastustajan toimesta kiistetty esimerkiksi häirinnällä. Lisäksi lennokkeihin soveltuvilla satelliittilähetinvastaanottimilla tiedonsiirtokapasiteetti jää alhaiseksi. Näin ollen luotettavimmaksi ulkoiseksi yhteydeksi sopii saman tiedonsiirtotekniikan käyttö kuin sisäisessäkin tiedonsiirrossa. Tällöin esimerkiksi paikallaan pysyvällä maa-asemalla on yhteyden parantamiseksi mahdollista käyttää monimutkaisempaa ja suurempaa antennirakennelmaa, kuin olisi järkevää asentaa lennokkeihin.

Lennokkiparvioiden tiedonsiirtokapasiteetti riippuu myös hyvin paljon lennokkien käyttöperiaatteesta. Esimerkiksi rakennuksen sisätiloja kartoittava Shield AI Nova-lennokkien parvi on todennäköisesti Wi-Fi-yhteyksille soveltuvien etäisyyksien päässä toisistaan, jolloin lennokkien välillä on mahdollista toteuttaa nopea tiedonsiirtoyhteys. Toisaalta lennokkien ollessa suorittamassa tiedustelutehtävää tai kadonneen henkilön etsintää suomalaisessa metsämaastossa, lennokkien yhteydet voivat kasvaa satoihin metreihin. Toisaalta sadan metrin päässä oleva lennokka tuskin tarvitsee toiselta lennokilta tarkkaa sensoritietoa, kuten lähimpien puiden sijaintia. Tällöin lennokkien välittämä tieto on todennäköisesti enimmäkseen telemetria- ja koordinaatitietoa, jolle riittää huonompikin tiedonsiirtoyhteys. Kaikkea lennokkien havaitsemaa tietoa ei siis ole tarpeellista lähettää heti kaikille parven lennokeille.

5. TIEDON VÄLITTYMINEN LENNOKKIPARVESSA

Tässä luvussa tarkastellaan johdannossa esiteltyjen DARPA:n lennokkiparvimallin ja ACL-luokittelun mukaan erilaisten parvien vaatimuksia aikaisemmin käsiteltyjen ympäristön havainnointi-, paikannus- ja kommunikointimenetelmien käytöstä.

5.1. Lukumäärä

Parven lennokkien lukumäärälle on käytännössä kaksi ääripäätä, vain muutamasta lennokista koostuva parvi sekä tuhansista lennokeista koostuva parvi. Parven koolla on merkitystä ympäristön havainnointisensoreiden kannalta. Suuri määrä toisiaan lähellä olevia aktiivisia sensoreita, kuten ultraäänisensorit tai valon kulkuaikaan (*ToF*) perustuvat kamerat, voivat häiritä toisiaan, tehden näiden sensoreiden käytöstä hankalaa. Toisaalta kuluttajakäyttöön suunnitelluissa lennokeissa aktiivisten sensoreiden aistimisetäisyys on lyhyt, todennäköisesti johtuen niiden käyttötarkoituksen olevan turvallisen lentämisen mahdollistaminen sisätiloissa. Tavallisilla kameroilla on taas mahdollista saada erilaisissa asetteluissa hyvä kattavuus ympäristöstä, mutta ne rajoittuvat vain toimintaan valoisissa tai valaistuissa olosuhteissa, toisin kuin aktiiviset sensorit. Toisaalta Shield AI Nova -lennokeissa on myös infrapuna-alueella toimivat kamerat, joille pimeissä tiloissa ympäristöä valaistaan ihmissilmälle näkymättömällä infrapuna-valolla.

Lennokkien oman sijainnin muutosta seuraavien inertiapaikannusjärjestelmien toimintaa ei parven koolla ole vaikutusta, sillä inertiapaikannus ei suoraan riipu ulkoisista signaaleista. Myöskään satelliittipaikannusjärjestelmät, jotka vain vastaanottavat satelliittien lähettämiä signaaleja, eivät suoraan ole riippuvaisia lennokkiparven koosta. Toisaalta kuvantunnistukseen perustuva navigointi voi jopa hyötyä suuremmasta määrästä lennokkeja. Useampi lennokka luomassa karttaa omasta toimintaympäristöstään voisi parantaa luodun kartan tarkkuutta, useamman lennokin havaitessa ja paikantaessa samoja kohteita. Radiosignaaleihin perustuva paikannus voisi esimerkiksi mahdollistaa lennokkien lennon muodostelmassa pelkästään seuraamalla kommunikointiin käytettävän radioyhteyden tilaa. Tällöin muut paikannusjärjestelmät voisivat olla pois päältä virrankulutuksen minimoimiseksi.

Pienessä lennokkiparvessa tiedon välittäminen onnistuu helposti reitityksen avulla, sillä reititystaulu on todennäköisesti pieni ja lennokkien sijaintien muutokset vaikuttavat pieneen osaan lennokkeja. Suuressa parvessa reititystaulun kasvaminen suureksi ja pienenkin muutoksen lennokkien sijainnissa pitää levitä koko verkon läpi reitityksen toimimiseksi kunnolla. Tulvahaku sen sijaan on suuressakin lennokkiparvessa luotettava ratkaisu, joskin se tuottaa suuren määrän tietoa, jota kaikki lennokit eivät välttämättä tarvitse.

5.2. Lennokin monimutkaisuus

Lennokkiparven lennokka voi olla rakenteeltaan yksinkertainen tai monimutkainen. Sensoreiden kohdalla rakenteeltaan yksinkertainen lennokka voi tarkoittaa sitä, että ympäristön havainnointi tapahtuu vain hyödyntäen yhden tyyppistä sensoria tai ääritapauksessa vain yhtä sensoria. Esimerkiksi tavallisten kameroiden yhteydessä esteiden havainnointi voidaan toteuttaa Skydio 2 -lennokin tapaan yhteensä kuudella lennokin ylä- ja alapuolelle sijoitetulla kameralla, joilla saadaan koko lennokin ympäristön kattava peitto. Toisaalta havainnointi voidaan toteuttaa pelkästään hyötykuormana toimivalla kameralla, jolloin hyötykameran täytyisi myös välillä tarkkailla ympäristöään eikä vain haluttua kohdealuetta. Sensoreiltaan monimutkaisessa Shield AI Nova -lennokeissa on taas käytössä hyvin monta erilaista sensoria, kuten näkyvän valon ja infrapunavalon kameroita, lidar-sensori, ultraäänisensori ja lämpökamera ja näiden sensorien fuusiolla luodaan lennokille ympäristötietoisuus. Nova-lennokkien sensorivaruustelusta voi huomata niiden suunnitellun autonomiseen toimintaan vaikeissa olosuhteissa, kuten pimeissä sisätiloissa, jolloin pelkästään esimerkiksi näkyvän valon kameroilla toimiminen voisi olla vaikeaa.

Kaupalliset siviilikäyttöön tarkoitetut lennokit käyttävät oman sijaintinsa määrittämiseen vain satelliittipaikannusta ja edullista alhaisen tarkkuuden omaavaa inertiaipaikannusta. Nämä ovat todennäköisesti riittäviä kuluttajakäyttöön, lennokkien lennättämiseen ulkona, jossa satelliittipaikannusjärjestelmien signaalit ovat yleensä hyvin saatavilla. Toisaalta sotilaskäyttöön suunnitellut Nova-lennokit sen sijaan kykenevät paikantamaan itsensä myös sisätiloissa omatoimisesti luomansa kartan perusteella, hyödyntäen kartan luomiseen ja paikannukseen ympäristön havainnointiin käytettäviä sensoreita. Monimutkaisemman sensorivalikoiman omaavat Nova-lennokit kykenevät siis toimimaan huonommissa olosuhteissa paikannusjärjestelmiltään yksinkertaisia lennokkeja paremmin.

Kommunikaatiojärjestelmät kuluttajakäyttöön tarkoitetuissa lennokeissa ovat yksinkertaisia. Ne toimivat pääsääntöisesti 2,4 GHz ja 5 GHz taajuusalueilla. Yksinkertaisimmillaan lennokkien yhteysmenetelmänä voi toimia langattomiin lähiverkkoihin tarkoitettu Wi-Fi. Toisaalta siviilitekniikkaa käyttävät lennokit eivät välttämättä kestä sotilaskäytössä elektronisen sodan käynnin vaikutuksia kuten lennokkien kommunikointiyhteyden häirintää. Toisaalta lennokkien ei välttämättä tarvitsisi luottaa vain yhteen kommunikaatiojärjestelmään, sillä monimutkaisemmassa lennokissa voi olla myös vaihtoehtoinen tiedonsiirtotapa. Haasteeksi useiden eri sensoreiden, paikannusjärjestelmien ja kommunikaatiojärjestelmien asentamisessa lennokkeihin muodostuu lennokkien rajallinen kuormankantokyky sekä akkukapasiteetti.

Lennokkien ei välttämättä tarvitsi olla erityisen pieniä. Tässä tutkimuksessa esitelty lennokit ovat kaikki pyöriväsiipisiä neliroottorisia koptereita, joiden halkaisija on alle 50 cm. Painavin lennokka tutkimuksessa esitellyistä on todennäköisesti Shield AI Nova, jonka valmistaja ei ilmoita lennokin massaa, mutta vaikuttaa samankokoiselta, ellei kookkaammalta kuin Kespry 2S, jonka massa on valmistajan ilmoituksen mukaan 2 kg. Suurempi lennokka mahdollistaa suuremman määrän sensoreita tai muita järjestelmiä, kuten suurempia tai useampia antennoja. Lennokin suuri koko ja suuri määrä sähköä kuluttavia järjestelmiä vaatii luonnollisesti lisää akkukapasiteettia, jolloin lennokka vaatii myös tehokkaammat moottorit ja suuremman akun, nostaten lennokin kokonaismassaa.

5.3. Parven rakenne

Parven rakenne vaikuttaa hyvin paljon parven sensoreihin ja kommunikaatioon. Jos lennokka-parven päätöksenteko tapahtuu keskitetysti, esimerkiksi yhdellä parvea johtavalla lennokilla, täytyy muiden lennokkien välittää omien sensoreidensa data johtolennokille. Esimerkiksi Skydio 2 -lennokka tuottaa kuudella tavallisella kameralla 45 megapikseliä tietoa. Koska Skydio 2 -lennokka ei ole parveilukykyinen, ei tätä tietomäärää ole tarkoitettu jaettavaksi. Toisaalta lennokkien on mahdollista myös itse analysoida aistimansa data ja kertoa parven johtajalle tai muille parven jäsenille havaitsemistaan esteistä, jolloin lähetettävän datan määrä voi vähentyä. ACL-luokittelun mukaan tasolla 4 (*sopeutuminen virheisiin ja tapahtumiin*) lennokit kykenevät väistämään esteitä muilta lennokeilta tulevan tiedon perusteella. ACL-luokittelu ei ota kantaa täytyykö lennokkien välittää sensorin tuottama data muille vai riittääkö pelkkä tieto mahdollisesta esteestä tai uhasta.

Koska paikannusjärjestelmät pääsääntöisesti perustuvat lennokin oman sijainnin määrittämiseen, ei parven rakenteella ole suurta vaikutusta käytettäviin järjestelmiin. Parven toimiessa johtajakeskeisesti, on johtolennokin tiedettävä muiden lennokkien sijainnit, jotta voi ohjata niitä oikeaan suuntaan. Myös radiosignaaleihin perustuva paikannus useaa eri sijainneissa toimivaa vastaanotinta hyödyntävällä vastaanotettujen signaalien aikaeroon perustuvalla paikannuksella yksinkertaistuu, sillä johtolennokka voi toimia varsinaisena paikannuksen tekevänä lennokkina, muiden parvien lennokkien toimiessa referenssivastaanottimina.

Kommunikaatio hierarkkisesti johdetussa parvessa voi tapahtua esimerkiksi johtolennokissa olevan tukiaseman kautta, johon parven muut lennokit yhdistyvät. Kommunikaatio voi toisaalta tapahtua myös ilman tukiasemia toimivan MANET-verkon avulla. Parven päätöksenteon ollessa hajautettu, todennäköisesti toimivin yhteystapa on ilman tukiasemia toimiva MANET-verkko, hajautetusti ajattelevalla parvella kun ei ole selvää johtajaa.

5.4. Heterogeenisyys

Lennokkiparvi voi koostua pelkästään samanlaisista lennokeista, joissa on kaikissa samat sensorit ja kommunikaatiojärjestelmä. Toisaalta lennokkiparven ei tarvitse koostua pelkästään samanlaisista lennokeista, jolloin parvessa voisi olla esimerkiksi pimeisiin ympäristöihin soveltuvia lennokkeja, joilla on sensoreillaan kyky toimia pimeässä. Useasta erityyppisestä lennokista koostuvassa parvessa, yksittäiset lennokit voisivat olla kevyitä ja erilaiset ympäristön havainnointiin soveltuvat sensorit olisi jaettu useaan eri lennokkiin, sen sijaan että ne olisivat kaikki yhdessä mahdollisesti raskaassa alustassa.

Myös paikannukseen käytettäviä järjestelmiä voisi jakaa eri lennokkeihin. Tällöin esimerkiksi osa parven lennokeista kykenisi käyttämään monimutkaisempia paikannusjärjestelmiä paikantamiseen ja muiden lennokkien tukemiseen paikkatiedolla esimerkiksi satelliittipaikannusjärjestelmien ollessa häirittyinä. Tällöin jokaiseen lennokkiin ei tarvitsisi rakentaa kykyä seurata maastoa kuvantunnistuksen keinoin tai ylimääräisiä radiovastaanottimia ulkoisten radiosignaalien seuraamista varten.

Usean eri lennokkityypin parvi mahdollistaa parven ulkopuoliseen kommunikointiin suunnitellut lennokit, joiden tehtävä on muodostaa yhteys lennokin operaattorille. Tällöin kaikissa parven lennokeissa ei tarvitsi olla pitkälle etäisyydelle toimivaa radiota, vaan ulkoisen viestinnän hoitaisivat siihen tarkoitukseen suunnitellut lennokit. Tällöin lennokeilla voitaisiin rakentaa parven sisälle esimerkiksi suuremman tiedonsiirtokapasiteetin omaava ”runkoverkko”.

Toisaalta lennokkien erikoistuminen parvessa voi johtaa siihen, että esimerkiksi kaikkien ulkoista viestintää tekevien lennokkien tuhoutuessa parvella ei enää ole kykyä ulkopuoliseen viestintään. Tällaisessa tilanteessa parven heterogeenisyydestä on haittaa, ja samanlaisilla lennokeilla parveen saataisiin parempi taistelunkestävyys. Nykyään käytössä olevat Intelin valonäytöksiin käytettävät lennokkiparvet sekä sotilaskäyttöön suunnitellut Perdix- ja LOCUST-järjestelmät koostuvat parven sisällä ilmeisesti samanlaisista lennokeista. Toisaalta samanlaisten lennokkien ohjaaminen parvessa voi olla myös helpompaa, sillä parvea ohjaavan älyn ei tarvitse kiinnittää huomiota parven erilaisiin lennokkeihin, vaan kaikilla lennokeilla on sama kyky toteuttaa annetut tehtävät. Voidaan siis ajatella erityyppisistä lennokeista koostuvan lennokkiparven olevan parven älylle haastavampi toteuttaa kuin samanlaisista lennokeista koostuva lennokkiparvi.

5.5. Yhteydenpito ihmiseen

Lennokkiparven ohjaus voi tapahtua kahden ääripään välillä. Yksinkertaisimmillaan ihminen ohjaa yhtä parven lennokkia ja parven muut lennokit seuraavat kyseisen lennokin toimintaa.

Toisessa ääripäässä lennokkiparvi toimii ilman ihmisen suoraa ohjausta, toteuttaen sille määritellyn tehtävän. Tämä osoittaa, ettei kaikkien lennokkiparvessa olevien lennokkien tarvitse olla samalla autonomian asteella. Ihmisen ohjaama lennokki toimisi siis ACL-tasolla 0, ollen kauko-ohjattu, ja parven muut lennokit korkeammalla tasolla. Toisaalta ihmisen ohjaama lennokkin voi olla autonominen ja vain tilapäisesti ihmisen ohjauksessa, mikä on mahdollista Shield AI Nova-lennokilla.

Valtaosa luvussa 2 esitellyistä sensoreista on tarkoitettu lennokkien oman ympäristötietoisuuden määrittämiseen, eivätkä siten ole tarpeellisia ihmisohjaajalle, olettaen ettei ihmisen tarvitse puuttua lennokkien toimintaan. Toisaalta osaa sensoreista, kuten lidar-sensoria, voidaan hyödyntää myös hyötykuormana, tuottaen tietoa, joka mahdollisesti kiinnostaa ihmistä. Näin toimii esimerkiksi Shield AI Nova-lennokki, joka tuottaa autonomisesti kartan rakennuksen sisältä ja tarvittaessa mahdollistaa myös lennokin ohjaamisen ihmisen toimesta. Tämä mahdollistaa kiinnostavien kohteiden tarkastelun, kun lennokki ei välttämättä tekoälyllään tunnista kaikkia uhkaavia kohteita.

Jos lennokkiparvea ohjataan ohjaajan toimesta, ohjaaja todennäköisesti haluaa tietää lennokkiparven lennokkien sijainnin, jotta niiden ohjaaminen olisi tehokasta. Toisaalta jälleen kerran parven toimiessa täysin autonomisesti, ei parvella ole välttämättä tarvetta välittää sijaintitietoa parven ohjaajalle. Jos lennokkiparvi on suunniteltu toimimaan autonomisesti myös ulkoisen kommunikaatioyhteyden katketessa, ei lennokkiparvella ole tällöin edes kykyä välittää omaa sijaintiaan tai tehtävän suoritusvaihetta parven ohjaajalle.

Yhteydenpidossa ihmiseen korostuu parven ulkoisen kommunikaation merkitys. Parven toimiessa kaukana parven ohjaajasta, ulkoiseen yhteyteen täytyy käyttää jotain muuta kuin parven sisäiseen kommunikaatioon tarkoitettua yhteyttä. Toisaalta parven toimiessa lähellä parven ohjaajaa, on yhteydenpito mahdollista toteuttaa käyttäen parven sisäiseen kommunikaatioon käytettävää järjestelmää myös ulkoiseen kommunikaatioon.

5.6. Autonomisuuden vaikutus

ACL-luokittelua tarkasteltaessa tässä tutkimuksessa käsitelty ympäristön havainnointi ja paikantamistechnologiat liittyvät ACL-luokittelun ensimmäiseen osa-alueeseen, *havainnointi*. Tasolta 4 (*sopeutuminen virheisiin ja tapahtumiin*) alkaen lennokkien pitäisi välittää oma sijainti- ja telemetria-tietonsa muille lennokeille. Telemetria-tiedon vaatiessa vain vähän tiedon siirtokapasiteettia, tämän luulisi onnistuvan nykyisillä teknologioilla. Tasolta 5 (*reaaliaikainen lennokkien koordinointi*) alkaen lennokkien pitäisi havainnoida ympäristöään omilla sen-

soreilla, sekä kyetä täydentämään tieto muilta lennokeilta saatavalla tiedolla. Tällöin siirrettävän tiedon määrä mahdollisesti kasvaa, mikä vaatii myös suurempaa tiedonsiirtokapasiteettia.

Tässä tutkimuksessa käsiteltyjen lennokkien ympäristön havainnointiin käytettävien sensoreiden kantama on kuitenkin melko lyhyt, todennäköisesti johtuen niiden käyttötarkoituksen olevan esteiden havaitseminen, eikä täyden tietoisuuden luominen ympäristöstä. Noustessa ACL-tasoa korkeammalle voidaan huomata, että vaatimukset lennokkien sensoreiden kantomalle kasvavat ja samalla tarve saada sensoritietoa muilta lennokeilta vähenee. Tällöin ympäristön havainnointiin tarvittavan sensoridatan välittäminen lennokkiparvessa vähenee ja tiedonsiirtokapasiteetti voidaan käyttää parven ajattelun mahdollistamiseen. Kuitenkin tässä tutkimuksessa käsitellyillä sensoreilla autonomian tasoksi todennäköisesti jää ACL-taso 5, joka toisaalta mahdollistaa parvelukyvyn.

Toisaalta tässä tutkimuksessa käsitellyn pienen lennokin tuskin tarvitsekaan omata täyttä ymmärrystä taistelukentän tilanteesta, vaan niille riittää ymmärrys omasta lähialueesta. Esimerkiksi Shield AI Nova-lennokki, joka on suunniteltu parveiluun, mutta ei vielä kykene siihen, on tarkoitettu sotilaskäyttöön rakennusten sisätilojen tarkastamiseen, joka on ihmisille riskialtis ja aikaa vievä tehtävä. Tällaisessa tilanteessa lennokeille riittää tieto vain kyseisen rakennuksen sisätilasta, ihmisen hoitaessa ulkopuolisen alueen.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tutkittiin lennokkiparviin soveltuvia sensoreita, paikannusjärjestelmiä sekä kommunikaatiojärjestelmiä tällä hetkellä käytössä olevien teknologioiden osalta. Tutkimuksessa on perehdytty tällä hetkellä markkinoilla oleviin tai markkinoille tuleviin autonomisia ominaisuuksia omaaviin lennokkeihin.

Ensimmäisessä alatutkimuskysymyksessä haettiin vastausta kysymykseen ”*Mitä sensoreita lennokit käyttävät ympäristön havainnointiin?*”. Tutkimuksessa käsitellyt lennokit käyttävän hyvin erilaisia sensoreita sekä eri sensoreiden yhdistelmiä oman ympäristönsä havainnointiin. Yksinkertaisimmillaan lennokin sensorina voi toimia pelkästään yksittäinen tavallista valoa aistiva kamera. Monimutkaisimmillaan lennokissa voi olla useita eri tarkoituksiin ja eri ympäristöihin käytettäviä sensoreita, joiden tuottama data yhdistetään ja analysoidaan tekoälyllä kartaksi ympäristöstä, kuten Shield AI Nova-lennokit tekevät.

Toisessa alatutkimuskysymyksessä haettiin vastausta kysymykseen ”*Mitä sensoreita ja paikannusjärjestelmiä lennokit käyttävät oman sijainnin määrittämiseen?*”. Kaupallisissa lennokeissa oman sijainnin paikannukseen käytetään pääasiassa satelliittipaikannuksen ja inertiaipaikannuksen yhdistelmää. Sotilaskäyttöön ja sisätiloihin suunnitellussa Shield AI Nova-lennokissa on mahdollista käyttää kuvantunnistukseen perustuvaa sijainnin määrittämistä. Radio-signaaleihin perustuvaa paikannusta ei ole käytössä yhdessäkään tässä tutkimuksessa käsitellyssä lennokissa. Varsinkin signaalien tuloaikojen eroon perustuva paikannus voisi olla käytökelpoinen lennokkiparvissa, sillä niissä on mahdollista käyttää useaa eri sijainnissa olevaa vastaanotinta signaalien vastaanottoon sekä lennokeilla on jo olemassa oleva tarve välittää tietoa keskenään.

Kolmannessa alatutkimuskysymyksessä haettiin vastausta kysymykseen ”*Miten yksittäiset ja parveilevat lennokit kommunikoivat?*”. Tällä hetkellä yksittäisten lennokkien ohjaamiseen voidaan käyttää joko 802.11 Wi-Fi -yhteyksiä tai valmistajien omia 802.11 Wi-Fi -verkkojen kanssa samoja taajuusalueita käyttäviä tiedonsiirtoyhteyksiä. Lennokkien välillä tiedonsiirtoyhteytenä voi toimia 802.11 Wi-Fi, joka tukee esimerkiksi ad hoc mesh -verkkoja. Haasteena 802.11 Wi-Fi -verkkojen kanssa on teknologian soveltumattomuus pitkiin huonolaatuisiin yhteyksiin. Lennokkiparven ulkopuoliseen tiedonsiirtoon soveltuvin tapa on käyttää samaa tiedonsiirtotapaa kuin sisäiseenkin tiedonsiirtoon, jolloin ulkoinen tiedonsiirto voidaan toteuttaa samoilla välineillä kuin sisäinenkin kommunikaatio.

Tutkimuksen päätutkimuskysymyksenä on ”*Miten ympäristö- ja paikkatieto välittyy lennokkiparvessa?*”. Koska ei ole olemassa vain yhtä tapaa toteuttaa lennokkien parveilu, riippuu len-

nokkiparven sensoreiden käyttö ja tiedonsiirto esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyn DARPA:n lennokkiparvimallin mukaisten osa-alueiden mukaisesti (*lukumäärä, lennokin monimutkaisuus, parven rakenne, heterogeenisyys ja yhteydenpito ihmiseen*). Kuitenkin on huomattavissa tiettyjä lain alaisuuksia, jotka helpottavat tai vaikeuttavat lennokkien parveilukykyä. Esimerkiksi rakenteeltaan yksinkertainen lennokka vain muutamalla yksinkertaisella sensorilla tuottaa todennäköisesti vähemmän dataa ja täten kuormittaa lennokkiparven tiedonsiirtoverkkoa vähemmän. Myös parven koolla on merkittävä vaikutus lennokkiparvessa siirrettävän tiedon määrään, suuressa parvessa tiedon reitityksen muodostuessa haasteeksi. Lennokkiparven autonomian taso vaikuttaa parven rakenteeseen sekä yhteydenpitotapaan ihmisohjaajaan. Suuren autonomian omaava lennokkiparvi ei välttämättä tarvitse jatkuvaa ihmisen ohjausta tai valvontaa ja lennokkiparvi voi kyetä täysin hajautettuun päätöksentekoon keskitetyn päätöksenteon sijasta.

Toisaalta DARPA:n malli tai ACL-luokittelu eivät ota kantaa lennokkiparviin käyttöperiaatteisiin. Rakennuksen sisätilan tarkistaminen muutaman lennokin parvella asettaa eri vaatimuksia sensoreille ja tiedonsiirtojärjestelmälle kuin toiminta ulkona laajemmalla alueella. Pienten lennokkien koko muodostaa myös rajoitteita, kuten pienestä akusta johtuva lyhyt toiminta-aika ja pienen lennokin alhainen kuormankantokyky, jotka rajoittavat lennokkien taktisia käyttökohteita.

Shield AI Nova-lennokit kuitenkin osoittavat, että tämän kokoluokan lennokeissa on mahdollista käyttää autonomiaan ja parveiluun soveltuvia sensoreita ja paikannusjärjestelmiä. Kyseisellä lennokilla on kuitenkin pieni ja rajallinen toimintaympäristö, johon kyseistä lennokkia on suunniteltu käytettävän. Valmistaja lupaa Shield AI Nova-lennokin parveilukykyyn tulevan vuonna 2021, jolloin todennäköisesti selviää lennokin todellinen kyvykyys parveiluun aja autonomiseen toimintaan.

6.1. Luotettavuus

Sotilaskäyttöön esiteltyjä Perdix- ja LOCUST-järjestelmiä lukuun ottamatta kaikki tutkimuksessa käsitellyt lennokit ovat pyöriväsiipisiä nelikopteri-tyyppisiä lennokkeja. Tämä ei kuitenkaan johdu tutkimuksen rajauksesta, vaan siitä ettei kiinteäsiipisiä autonomiaa omaavia lennokkeja löydetty tutkimuksessa. Myöskään Perdix- ja LOCUST-järjestelmistä ei kyetty löytämään riittävästi tietoa niiden tarkempaan käsittelyyn.

Eri teknologioiden toimintaa on käsitelty pääasiassa perustuen tieteellisiin artikkeleihin ja konferenssijulkaisuihin sekä kyseisiä teknologiaa käsittelevän peruskirjallisuuden avulla.

Näiden lähteiden käyttökelpoisuus varsinkin sotatekniikkaan liittyen on tutkijan arvion mukaan hyvä.

Kirjallisuutta on pyritty tukemaan uudemmallalla tiedolla eri valmistajien esitteiden perusteella, jolloin on saatu myös näkökulma markkinoilla olevista tuotteista, sekä niiden todellisuudessa käyttämästä teknologiasta. Tässä on toki huomioitava, että yritysten tekemä tuotekehitys vie aikaa, ja nykyään markkinoilla oleva tai markkinoille tulossa oleva lennokka on todennäköisesti ollut tuotekehityksessä jo pitkän aikaa. Tällöin nyt markkinoilla olevan lennokin tekniikka voi olla jo vanhentunutta verrattuna uusimpiin teknologioihin. Toisaalta yritysten tuottama esittelymateriaali voi pyrkiä esittämään vain tuotteen parhaita puolia markkinointitarkoituksessa ja täten edistämään tuotteen myyntiä. Esimerkiksi Skydio 2 -lennokin valmistaja vertaa lennokkia useassa tilanteessa kilpailevaan DJI Mavic 2 -lennokkiin, saaden oman lennokin näyttämään paremmalta.

6.2. Jatkotutkimusehdotuksia

Tässä tutkimuksessa ei ole käsitelty lennokkiparvien ”älyn” toteuttamista, joka on yksi merkittävä lennokkien parveiluun vaadittava teknologia. Tässä tutkimuksessa käsitellyssä ACL-taulukossa nousee esiin hyvin nopeasti tarve yksittäisten lennokkien sekä lennokkaiparvien ajattelulle ja päätöksenteolle. Täten myös yksittäisten lennokkien autonomisuus vaatii jatkotutkimusta.

Tässä tutkimuksessa ei ole myöskään käsitelty lennokkiparvien käytettävyyttä sotilaallisesti, lukuun ottamatta Shield AI Nova-lennokkia ja sen käyttöä. Eri organisaatioilla on todennäköisesti muitakin käyttökohteita tai tarpeita, jotka parveilukykyiset autonomiset lennokit pystyisivät hoitamaan, kuin esimerkiksi RoboConOps-tutkimuksessa on käsitelty. Tässä tutkimuksessa on selvitetty perusteet pienten lennokkien sensoreista ja kommunikaatiosta, joiden perusteella jatkossa voidaan tutkia lennokkiparville mahdollisia käyttökohteita oikeaan käyttöön.

LÄHTEET

- [1] Amuru, S. & Buehrer, R. *Optimal Jamming Against Digital Modulation*. In IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 10, no. 10, pp. 2212-2224, Oct. 2015. doi: 10.1109/TIFS.2015.2451081
- [2] Angrisano A, Petovello M, Pugliano G. *Benefits of combined GPS/GLONASS with low-cost MEMS IMUs for vehicular urban navigation*. Sensors (Basel). 2012;12(4): pp. 5134–5158. doi:10.3390/s120405134
- [3] Aruba Networks. *802.11AC IN-DEPTH*. 2014. [selvitys], [Viitattu 4.2.2020]. Saatavissa: https://www.arubanetworks.com/assets/wp/WP_80211acInDepth.pdf
- [4] BeiDou Navigation Satellite System. *China Successfully Launched the 52nd and 53rd BDS Satellites* [uutisartikkeli]. 16.12.2019 [Viitattu: 14.1.2020]. Saatavissa: http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201912/t20191216_19691.html
- [5] Benslimane A., Yakoubi A. & Bouhorma M. *Analysis of Jamming Effects on IEEE 802.11 Wireless Networks*. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, 2011, pp. 1-5. doi: 10.1109/icc.2011.5962627
- [6] Bosch Sensortec GmbH. *Bosch BMI088 High-performance Inertial Measurement Unit (IMU)* [valmistajan esite]. [Viitattu: 17.1.2020]. Saatavissa: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bmi088-fl000.pdf
- [7] Chandhar, P., Danev, D. & Larsson, E. *Massive MIMO for Communications With Drone Swarms*. In IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 3, pp. 1604-1629, March 2018. doi: 10.1109/TWC.2017.2782690
- [8] Choi, O. & Lee, S. *Wide range stereo time-of-flight camera*. 2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, Orlando, FL, 2012, pp. 557-560.
- [9] Chung, T. *OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET)* [esitys]. DARPA. [Viitattu: 28.1.2019]. Saatavissa: https://www.darpa.mil/attachments/OFFSET_Sprint1_Virtual_ProposersDay%20website.pdf
- [10] Chung, T. *OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET)* [verkkosivu]. DARPA. [Viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.darpa.mil/program/offensive-swarm-enabled-tactics>

- [11] Chung, T. *What is a swarm?* [video]. Youtube, DARPA tv. 12.10.2017 [Viitattu: 28.1.2019]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=rE-qvV13nHQ>
- [12] Clough B. *Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway?*. Air Force Research Lab, Wright-Patterson AFB, OH, AUG 2002.
- [13] Conte, G. & Doherty, P. *An Integrated UAV Navigation System Based on Aerial Image Matching*. 2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2008, pp. 1-10. doi: 10.1109/AERO.2008.4526556
- [14] Courbon, J., Mezouar, Y., Guénard, N. & Martinet, P. *Vision-based navigation of unmanned aerial vehicles*. 2010. Control Engineering Practice. 18. 789-799. 10.1016/j.conengprac.2010.03.004.
- [15] Cui Huihai, Liu Shuqiang & Zeng Yingsheng, *An obstacle detection algorithm used sequential sonar data for Autonomous Land Vehicle*. IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Chengdu, 2011, pp. 255-259.
- [16] Cui, Q., Liu, P., Wang, J. & Yu J. *Brief analysis of drone swarms communication*. 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Beijing, 2017, pp. 463-466
- [17] Dalbah, Y., Rohr, S. & Wahl, F. *Detection of dynamic objects for environment mapping by time-of-flight cameras*. 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Paris, 2014, pp. 971-975.
- [18] Daniel, K., Dusza, B. & Wietfeld, C. *Mesh Network for CBRNE-Reconnaissance with MUAV Swarms*. 2009. 4th Conference on Safety and Security Systems in Europe, Potsdam.
- [19] DJI, *MAVIC 2 PRO / ZOOM User Manual V2.0* [käyttöohjekirja]. 4.2019. [Viitattu: 2.9.2019]. Saatavissa: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2/Mavic_2_Pro_Zoom_User_Manual_V2.0_en.pdf
- [20] DJI, *Phantom 4 PRO / PRO+ SERIES User Manual V1.6* [käyttöohjekirja]. 5.2018. [Viitattu: 2.9.2019]. Saatavissa: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20180508/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_Series_User_Manual_EN.pdf
- [21] Durrant-Whyte, H. & Bailey, T. *Simultaneous localization and mapping: part I*. In IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, June 2006. doi: 10.1109/MRA.2006.1638022

- [22] Engineering ToolBox. *Illuminance - Recommended Light Level*. [verkkosivu]. 2004. [Viitattu: 6.4.2020]. Saatavissa: https://engineeringtoolbox.com/light-level-rooms-d_708.html
- [23] Equipment World. *Kespry Drone 2s brings centimeter-level survey accuracy, single base station setup to automated drone platform* [uutisartikkeli]. 22.2.2017 [Viitattu: 28.1.2020]. Saatavissa: <https://www.equipmentworld.com/kespry-drone-2s-brings-centimeter-level-survey-accuracy-single-base-station-setup-to-automated-drone-platform-video/>
- [24] European Global Navigation Satellite Systems Agency *European Global Navigation Satellite Systems (EGNSS) for drones operations* [whitepaper]. ISBN 978-92-9206-045-9
- [25] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *FAQ*. [Viitattu: 14.1.2020]. Saatavissa: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/faq>
- [26] European Global Navigation Satellite Systems Agency. *GSA GNSS Market Report 2019 / Issue 6*. Luxembourg, European Union, 2019. ISBN 978-92-9206-043-5
- [27] Fernandez-Hernandez, I., Vecchione, G., Díaz-Pulido, F., Jeannot, M. & Valentaite, G., Blasi, R., Reyes, J. & Simón, J. *Galileo High Accuracy: A Programme and Policy Perspective*. In: 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany. 2018.
- [28] GPS.gov. *New Civil Signals*. [Viitattu 14.1.2020] Saatavissa: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- [29] GPS.gov. *Space Segment*. [Viitattu: 14.1.2020]. Saatavissa: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [30] Honeywell. *HG1700 Inertial Measurement Unit* [valmistajan esite]. [Viitattu: 17.1.2020]. Saatavissa: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/en-us/documents/learn/products/sensors/brochures/N61-1619-000-001-HG1700InertialMeasurementUnit-bro.pdf>
- [31] Honeywell. *HG1930 Inertial Measurement Unit* [valmistajan esite]. [Viitattu: 17.1.2020]. Saatavissa: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/en-us/documents/learn/products/sensors/brochures/N61-1637-000-000-HG1930InertialMeasurementUnit-bro.pdf>
- [32] Honeywell. *HG9900 Inertial Measurement Unit* [valmistajan esite]. [Viitattu: 17.1.2020]. Saatavissa: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/en-us/documents/learn/products/sensors/brochures/N61-1637-000-000-HG9900InertialMeasurementUnit-bro.pdf>

us/documents/learn/products/sensors/brochures/N61-1638-000-000-hg9900inertialmeasurementunit-bro.pdf

- [33] Honeywell. *Inertial Measurement Units (IMUs)* [valmistajan sivusto]. [Viitattu: 17.1.2020]. Saatavissa: <https://aerospace.honeywell.com/en/learn/products/sensors/inertial-measurement-units>
- [34] *How Intel Made Its World Record-Breaking Drone Show* [video]. Youtube, CNBC, 18.7.2018. [Viitattu: 25.2.2019]. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=zdLjoqa_oUs
- [35] Hrabar, S., Sukhatme, G., Corke, P., Usher, K. & Roberts, J. *Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV*. 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Alta., 2005, pp. 3309-3316.
- [36] Hughes. *JUPITER System*. [verkkosivu]. [Viitattu: 4.3.2020]. Saatavissa: <https://www.hughes.com/technologies/broadband-satellite-systems/jupiter-system>
- [37] Hughes. *Mobile Satellite Systems and Terminals*. [verkkosivu]. [Viitattu: 4.3.2020]. Saatavissa: <https://www.hughes.com/technologies/mobile-satellite-systems-and-terminals>
- [38] Inside GNSS. *Broadcom Releases Dual-Frequency GNSS Receiver with Centimeter Accuracy for Consumer LBS Applications* [uutisartikkeli]. 21.9.2017 [Viitattu: 14.1.2020]. Saatavissa: <https://insidegnss.com/broadcom-releases-dual-frequency-gnss-receiver-with-centimeter-accuracy-for-consumer-lbs-applications/>
- [39] Inside GNSS. *Galileo Hits the Spot: Testing GNSS Dual Frequency with Smartphones* [verkkoartikkeli]. 23.9.2019 [Viitattu 14.1.2020]. Saatavissa: <https://insidegnss.com/galileo-hits-the-spot-testing-gnss-dual-frequency-with-smartphones/>
- [40] Irani, G. & Christ, J. *Image processing for Tomahawk scene*. Johns Hopkins APL Technical Digest 15.3. 1994. s. 250-264.
- [41] Iridium Satellite LLC, *Iridium Core 9523 Satellite Transceiver Module* [valmistajan esite]. 2014. [Viitattu: 27.2.2020]. Saatavissa: <https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=23977>
- [42] Iridium Satellite LLC, *Iridium IoT comparison chart* [valmistajan esite]. 2017. [Viitattu: 27.2.2020]. Saatavissa: <https://www.iridium.com/download/?d1m-dp-dl=24127>

- [43] Jayatilleke, L. & Zhang, N. *Landmark-based localization for Unmanned Aerial Vehicles*. 2013. SysCon 2013 - 7th Annual IEEE International Systems Conference, Proceedings. 448-451. 10.1109/SysCon.2013.6549921.
- [44] Kapoor, R., Ramasamy, S., Gardi, A. & Sabatini, R. *UAV navigation using signals of opportunity in urban environments: An overview of existing methods*. 2017. Energy Procedia, vol. 110, pp. 377-383.
- [45] Kassas, Z., Khalife, J., Shamaei, K. & Morales, J. *I Hear, Therefore I Know Where I Am: Compensating for GNSS Limitations with Cellular Signals*. In IEEE Signal Processing Magazine, vol. 34, no. 5, pp. 111-124, Sept. 2017. doi: 10.1109/MSP.2017.2715363
- [46] Keselman, L., Woodfill, J., Grunnet-Jepsen, A. & Bhowmik, A. *Intel RealSense Stereoscopic Depth Cameras*. 2017. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. DOI 10.1109/CVPRW.2017.167
- [47] Kespry, *How Industrial Drones Work* [verkkosivu]. [Viitattu 2.9.2019]. Saatavissa: <https://www.kespry.com/how-it-works/>
- [48] Kosola, J. *Drone-parvet tulevat nopeammin kuin uskommekaan*. Sotilasaikakausilehti 8/2018. s. 62.
- [49] Kukko, A. *Mobile laser scanning - system development, performance and applications*. Väitöskirja. Kirkkonummi, 2013. Aalto Yliopisto, Maankäyttötieteiden laitos. Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisuja 153. 247 s.
- [50] Kuusniemi, H. *Sisätilanavigointi* [verkkoartikkeli]. Maanmittauslaitos. [Viitattu: 29.1.2020]. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/sisatilanavigointi>
- [51] Laarni, J., Koskinen, H. & Väättänen, A. *RoboConOps- Operointikonseptin kehittäminen robottiparvien ohjaukseen* [tiivistelmäraportti]. 2016/2500M-0048. ISBN 978-951-25-2844-8
- [52] *Lentokelpoisuus- ja operointivaatimukset miehittämättömässä sotilasilmailussa*, SIM-Ma-Lt-014, Tikkakoski: Sotilasilmailun viranomaisyksikkö, 13.10.2017
- [53] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, *Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin käyttäminen ilmailuun*. OPS M1-32. TRAFI/334638/03.04.00.00/2017
- [54] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä*. 15AO/2019 M, 9.1.2019.

- [55] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Radioasemat Suomessa* [verkkosivu]. [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/tv-ja-radio/radioasemat-suomessa>
- [56] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Tv-asemat Suomessa* [verkkosivu]. [Viitattu: 4.2.2020]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/tv-ja-radio/tv-asemat-suomessa>
- [57] Lin, J. & Singer, P. *China is making 1,000-UAV drone swarms now* [verkkoartikkeli] Popular Science. 9.1.2018. [Viitattu: 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.popsci.com/china-drone-swarms>
- [58] *LOCUST* [video]. Youtube, usnavyresearch. 14.4.2015. [Viitattu: 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=AyguXoum3rk>
- [59] Maanmittauslaitos. *Eurooppalainen paikannusjärjestelmä Galileo* [verkkosivu]. [Viitattu 7.1.2020]. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/paikannusjarjestelma-galileo>
- [60] Maanmittauslaitos. *Maanmittauslaitoksen ortokuva* [tuotekuvaus]. [Viitattu: 29.1.2020]. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/ortokuva>
- [61] Maanmittauslaitos. *Satelliittipaikannus* [verkkosivu]. [Viitattu: 7.1.2020]. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/satelliittipaikannus>
- [62] Maini A. *Handbook on defence electronics and optronics*. Great Britain: Wiley, 2018. 1152 p. ISBN 9781119184706
- [63] Martin, R., Velotta, J. & Raquet, J. *Bandwidth Efficient Cooperative TDOA Computation for Multicarrier Signals of Opportunity*. In IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 57, no. 6, pp. 2311-2322, June 2009. doi: 10.1109/TSP.2009.2014813
- [64] Morales, J., Khalife, J. & Kassas, Z. *Collaborative Autonomous Vehicles with Signals of Opportunity Aided Inertial Navigation Systems*. 2017. pp. 805-818. 10.33012/2017.14896.
- [65] Namuduri K., Chaumette S., Kim J. & Sterbenz J. *UAV networks and communications*. Cambridge University Press. United Kingdom. 2018. 242 p. ISBN 978-1-107-11530-9
- [66] Nurmio S. *Pienten kaupallisten multikopterien suorituskyky taistelukentän valvonnassa*. Pro gradu. 2018. Maanpuolustuskorkeakoulu. 92 s.

- [67] Office of Naval Research. *LOCUST: Autonomous, swarming UAVs fly into the future* [verkkosivu]. [Viitattu: 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.onr.navy.mil/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR.aspx>
- [68] Opromolla, R., Fasano, G., Rufino, G., Grassi, M. & Savvaris, A. *LIDAR-inertial integration for UAV localization and mapping in complex environments*. 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Arlington, VA, 2016, pp. 649-656.
- [69] Park, J. & Kim, Y. *Stereo vision based collision avoidance of quadrotor UAV*. 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems, JeJu Island, Korea, 2012, pp. 173-178.
- [70] *Perdix Swarm Demo Oct. 2016* [video]. Office of the Secretary of Defense Public Affairs. 26.10.2016. [Viitattu: 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.dvidshub.net/video/504622/perdix-swarm-demo-oct-2016>
- [71] Saha, S., Natraj, A. & Waharte, S. *A real-time monocular vision-based frontal obstacle detection and avoidance for low cost UAVs in GPS denied environment*. 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology, Yogyakarta, 2014, pp. 189-195.
- [72] Sazdovski, V., Silson, P. & Tsourdos, A. *Inertial Navigation aided by Simultaneous Localization and Mapping*. 2010 5th IEEE International Conference Intelligent Systems, London, 2010, pp. 43-48. doi: 10.1109/IS.2010.5548334
- [73] *Shield AI Nova* [video]. Vimeo, Shield AI. 8.2.2019 [Viitattu: 28.1.2020]. Saatavissa: <https://vimeo.com/316222669>
- [74] Shield AI. *Nova Class AI-UAS* [valmistajan sivusto]. [Viitattu: 28.1.2020]. Saatavissa: <https://www.shield.ai/nova>
- [75] Shield AI. *Shield Ai Fundamentals: On The Challenges Of Autonomy* [valmistajan sivusto]. [Viitattu: 28.1.2020]. Saatavissa: <https://www.shield.ai/content/2019/1/15/on-the-challenges-of-autonomy>
- [76] Shrit, O., Martin, S., Al Agha, K., Pujolle, G. *A new approach to realize drone swarm using ad-hoc network*. 2017 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MedHoc-Net), Jun 2017, Budva, Montenegro. IEEE, 2017
- [77] *Skydio 2, The drone you've been waiting for*. [verkkosivu]. [Viitattu: 31.12.2019]. Saatavissa: <https://www.skydio.com/>

- [78] Tang, Y., Hu, Y., Cui, J., Liao, F., Lao, M., Lin, F. & Teo, R. *Vision-Aided Multi-UAV Autonomous Flocking in GPS-Denied Environment*. In IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 1, pp. 616-626, Jan. 2019. doi: 10.1109/TIE.2018.2824766
- [79] The Strategic Capabilities Office. *Perdix fact sheet* [Viitattu 11.9.2019] Saatavissa: <https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>
- [80] Titterton D. & Weston J. *Strapdown Inertial Navigation Technology - 2nd Edition*. The Institution of Electrical Engineers, 2004. ISBN 0 86341 358 7
- [81] United Nations Office for Outer Space Affairs. *Current and Planned Global and Regional Navigation Satellite Systems and Satellite-based Augmentations Systems*. New York, United Nations, 2010. Saatavissa: http://www.unoosa.org/pdf/publications/icg_ebook.pdf
- [82] Vaaja, M., Hyyppä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., & Hyyppä, H. & Alho, P. *Mapping Topography Changes Using a Mobile Laser Scanner*. Remote Sensing. 2011, 3, pp. 587-600; doi:10.3390/rs3030587
- [83] Woodman O. *An introduction to inertial navigation*. University of Cambridge Computer Laboratory. Elokuu 2007. ISSN 1476-2986
- [84] Zabatani A., Surazhsky, V., Sperling, E., Moshe, S., Menashe, O., Silver, D., Karni, Z., Bronstein, A., Bronstein, M. & Kimmel, R. *Intel® RealSense™ SR300 Coded light depth Camera*. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.
- [85] Zorn, S., Gardill, M., Rose, R., Goetz, A., Weigel, R. & Koelpin, A. *A smart jamming system for UMTS/WCDMA cellular phone networks for search and rescue applications*. 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, Montreal, QC, 2012, pp. 1-3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6257769